

市販黄銅線の応力腐蝕に関する研究： 捩り応力の場合

その他（別言語等） のタイトル	On the Stress Corrosion of Commercial Brass Wire : Under the Shear Stress in Torsion
著者	西田 恵三
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	2
号	3
ページ	709-725
発行年	1957-12-25
URL	http://hdl.handle.net/10258/3103

市販黄銅線の応力腐蝕に関する研究*

(捩り応力の場合)

西 田 恵 三

On the Stress Corrosion of Commercial Brass Wire

(Under the Shear Stress in Torsion)

Keizo Nishida

Abstract

Commercial brass wire (2 m/m dia.) was corroded under various shear stresses in the flowing ammonium gas mixed with oxygen and water vapor at 35°C.

Firstly, the relation between initial shear stress and time to failure was observed at each as drawn and annealed sample. Then, their cracked structure was examined with microscope, and their macro-direction was correlated to the initial stress.

As the results, the following details were found:

1. With the as drawn state, the time-to-failure curve was exceedingly bent at the point seemed to be its yield point, and under lower stress, this changed linearly with the logarithm of time. On the other hand, with the annealed one, the stress corrosion limit was observed at 5.1 kg/mm².

2. The behavior of cracking was about the same with that stated in the previous paper, but their macroscopic direction was characterised with each state: that is, with annealed one, cracks sloped about 75° to the axis of the sample, but near axis, it changed to 45°. With as drawn one, below their yield point, their slope is vertical or 70-80°, but above the point, they increased in number and especially in vertical ones, and near axis, it decreased up to 40°. These phenomena are mainly due to the combination of the applied shear stress and the residual stress from the previous working, that is, drawing.

3. These results were compared with that corrosion under the tensile stress, and it was observed that, for annealed one, cracking time was more elongated with shear stress than with tensile one; but for as drawn, with that it shortened the life instead with this under lower stress. So, it seemed that two axial stress would induce the complex action on these stress corrosion of brass wire.

I. 緒 言

著者は先に市販黄銅線 (2 m/mφ) について簡単な装置によるアムモニアガス雰囲気中での

* 1957 年 4 月 日本金属学会春期講演大会 (東京) に発表.

引張応力による応力腐蝕の研究を発表したが¹、これは装置が簡単なだけに、外界の影響を受けやすいので、本研究においては、ガス流動法を採用した。また、先の研究では、加工による残留応力（引張応力）が、これの焼鈍材にくらべてその破断時間をはるかに短縮することが判明したので、今回は、かかる加工材に対して、振りによる剪断応力を与えた場合、いかなる挙動を示すか、これを引張応力の場合と比較検討した。もちろん、今回は、同一条件で引張応力腐蝕をも行なつた。

振りによる応力腐蝕に関しては、すでに黄銅材に関しては Morris² が、また Al 合金 (10 % Mg) に対しては Mears, Brawn および Dix³ が発表しており、丸棒試片軸にある角度 (大体 45°) をなして亀裂破断を生ずることをのべているが、その亀裂組織の細部にわたつては言及していない。もちろん、ただ単なる振りのみによる破断では、円棒試片の軸に垂直な面で破断されることは衆知の事であつて*、応力腐蝕の場合には、その様相がこれと異なっていることは、第一に注目すべき事であろう。

これまでの研究結果から見て、応力腐蝕の場合の巨視的破断面は、たとえ引張応力下でもその巨視的剪断応力最大の面 (引張応力軸と 45° をなす面) では生じておらず、従つて単に応力の大小のみではその亀裂方向を論ずることが出来ず、その表面から入つた亀裂の拡大が破断に大なる効果をおよぼすことも明らかである。もちろん、棒試片に振りによる剪断応力を与えた場合には、棒軸と 45° をなす面上で剪断応力に等しい引張応力が生じている⁴ ことから、先述の実測破断方向が現われたものである。

以上の事実から、本研究においては、引張加工を受けた材料と、これを焼鈍したものに対して、外部から単純引張応力と振り剪断応力をさらに重畳した場合に、その亀裂組織にいかなる差異を生ずるか、またその破断時間がいかに変化するかについて、比較検討した結果を報告する。

II. 試料およびその研究方法

§1. 試料およびその処理

試料は市販の約 2 m/mφ の黄銅線で、その組成は第 1 表に示した通りであつて、これは前

1 西田：室工大研報。第 2 巻，第 1 号 (1955 年)。

2 A. Morris: Transactions, Am. Inst. Min. Met. Egrs., Vol. 89, p. 249 (1930)。

3 R. B. Mears, R. H. Brown and E. H. Dix, Jr.: "Symposium on Stress Corrosion Cracking of Metals" (1945)。

* 寿時：“金属材料の機械的試験”，日本金属学会 (1956) p. 15 によれば、これは変形能の高い材料の場合であつて、もろい材料では破面が試片軸に対して大体 45° の傾斜を持つ。α 黄銅の場合は普通前者に相当する。

4 前掲脚註 3) および、寿時：金属材料の機械的試験，日本金属学会 (1956) p. 15。

第1表 試料の組成 (%)

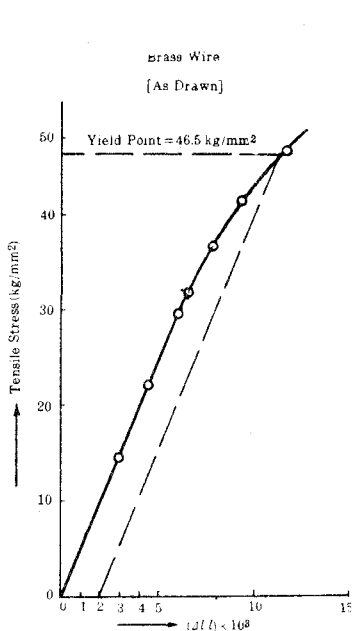
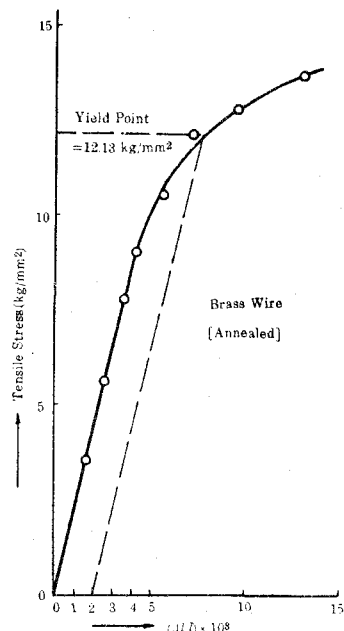
Cu	Zn	Fe	Pb	Sn
66.76	32.78	0.31	—	—

報と大差がなく、Fe が多少含まれており、その組織 (写真1) および引張応力—伸曲線 (第1図) から見ても判る通り、前報の試料よりも結晶粒子が大であり、かつ、その加工度も少ない様に思われる (本試料をもつて、加工材と呼ぶことにする)。

焼鈍材は上記加工材を 600°C で炭素粉末中で1時間焼鈍し、これを空中放冷したものを用いたが、この処理によつても、表面の脱亜鉛現象はほとんど認められなかつた。この組織は写真2に示す通りであつて、再結晶により、焼鈍前よりも粒子が全体的に小さくなつてゐる。この材料に対しての引張応力による応力—伸曲線は第2図に示す通り、その降伏点は加工材 (46.5 kg/mm^2) にくらべてはるかに低い (12.13 kg/mm^2)。

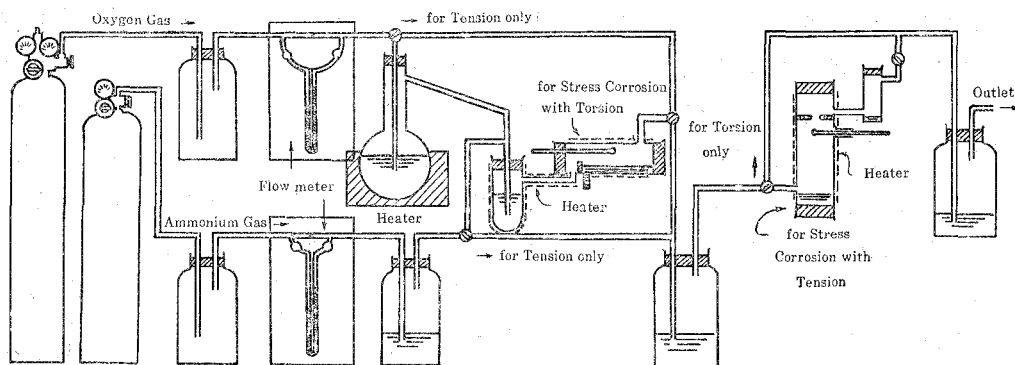
これらの兩種試料は試験する前にエメリー紙 05 仕上げを行なつたが、加工材は $2 \text{ m/m}\phi$ に、また焼鈍材は念のため、 $1.95 \text{ m/m}\phi$ に調整し、ともに脱脂の目的で、約30分以上ベンゼンに浸漬した。

腐蝕箇所は試料 (250 mm) の中央 25 mm の部分に限り、不要の部分は蜜ろうで被覆した。

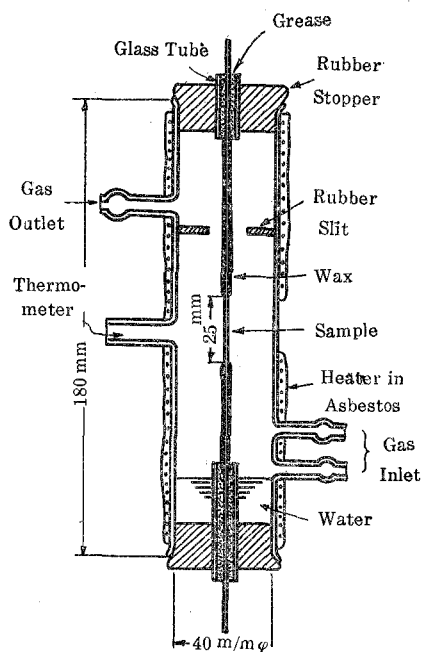
第1図 応力—歪曲線図
(加工材)第2図 応力—歪曲線図
(焼鈍材)

§2. 研究方法

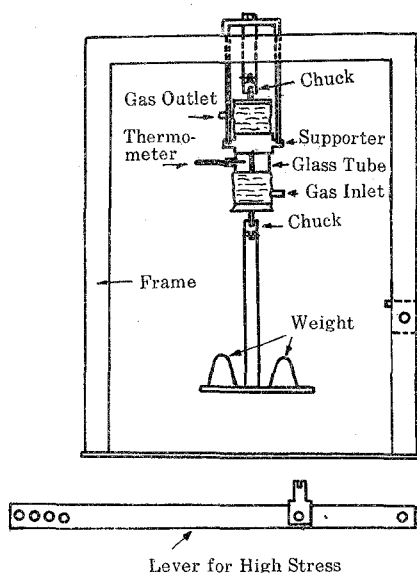
腐蝕雰囲気としては、アムモニアガス；酸素ガスをそれぞれ各ポンペより流通させ（流量＝100 cc/min）、水蒸気は腐蝕容器の低部に水を一定量入れ、これを両ガス混合気体が通過する様にした*。その全装置を示せば第3図の通りである。両種の応力腐蝕を同時に行なう時には、



第3図 実験装置全図 (略図)

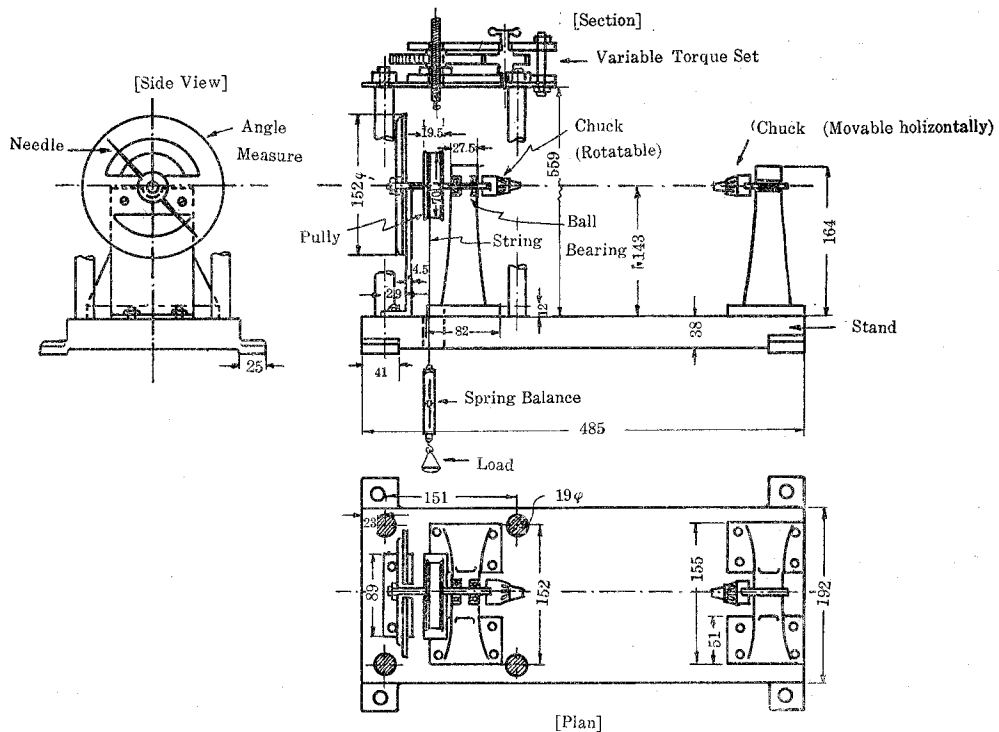


第4図 引張応力腐蝕装置
(腐蝕容器内部)



第5図 引張荷重による
応力腐蝕装置

* 雰囲気中の水分測定には、腐蝕容器の出口を寒剤中に通した蛇管に導き、ここで水分を凝結させ（アムモニア水も含まれる）、これから化学分析によつて、その水分を決定した。これによると、含まれる水分は水の量で0.5 cm³/minの速度である。



第6図 線材振り試験機 (単位: mm)

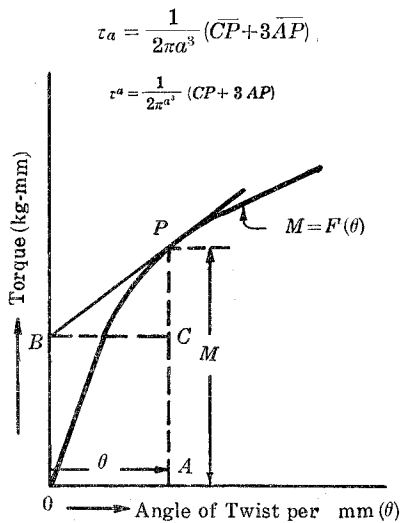
振り応力下の腐蝕に使用した焼ガスを用いたが、これによつてもその結果に差異は認められなかった。腐蝕雰囲気温度は $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ とし、これには容器の外側を電熱によつて常に一定温度になる様に調節した (第4図)。又引張応力装置は第5図に示す様な懸垂型とし、高荷重の必要な時には挺子を用いた。また破断後の試料の組織検査は前報と同様に行なつた。

振りによる剪断応力を与えるには、第6図に示したごとき装置を試作した。試料を握むにはジャコブスチャックを用い、これが一方ではボールベアリングに支えられ、この軸の廻転は軸端に附属する指針の角度によつて測定する。他端のチャックは水平可動とした。トルクは、廻転軸のプリー (70 m/mφ) に弦をつけ、この先端にスプリング秤をつけ、さらに皿を吊して、これに一定荷重をのせた。これによつて一定トルクが測定中与えられる。また、振り応力による応力-歪曲線を求めるには、第6図 [Section] の上方に示した上下可動装置により、この間にスプリング秤を附属させ、大体一定早さで徐々にトルクを加減して、その時の針のフレを測定した。

§3. 振りによる剪断応力の決定

これは Nadai⁵⁾ の示す方法に従つて、最初振り角〜トルク曲線を求め、これを基礎にして、

5 Nadai: "Plasticity" p. 126 (1931)



第7図 モーメント—捩り角から剪断応力を求める図式解法

第7図に示した図式解法により、試料表面の剪断応力 τ_a は次のごとくなる：

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi a^3 \theta^2} \frac{d}{d\theta} (M\theta^3)$$

$$= \frac{1}{2\pi a^3} (\overline{CP} + 3\overline{AP})$$

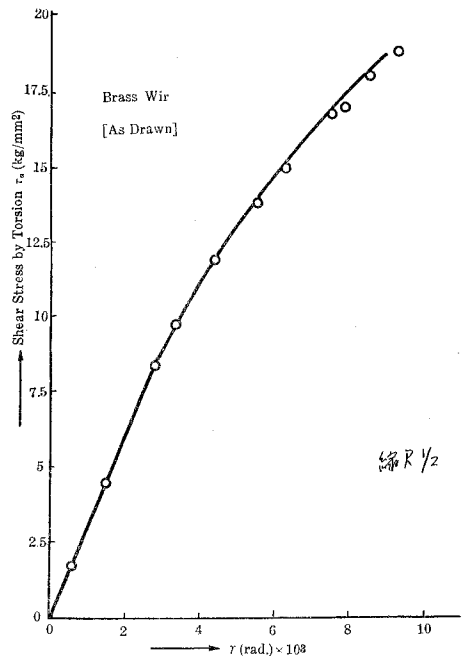
ここで a = 試料の半径 (mm)
 θ = 捩り角 (ラジアン/mm)
 M = 捩りモーメント (kg-mm)

またひずみ度 γ は次式で表わされる

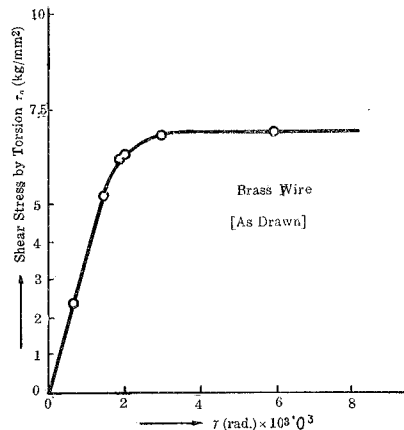
$$\gamma = a\theta$$

これから τ_a (kg/mm²) が γ (ラジアン) の函数として得られるが、加工材；焼鈍材について、得られた結果を示せば、第8図および第9図の様

である。これによれば、焼鈍効果が捩りに対しては非常に強く現われている様に見える。



第8図 剪断応力—歪曲線図 (加工材)



第9図 剪断応力—歪曲線図 (焼鈍材)

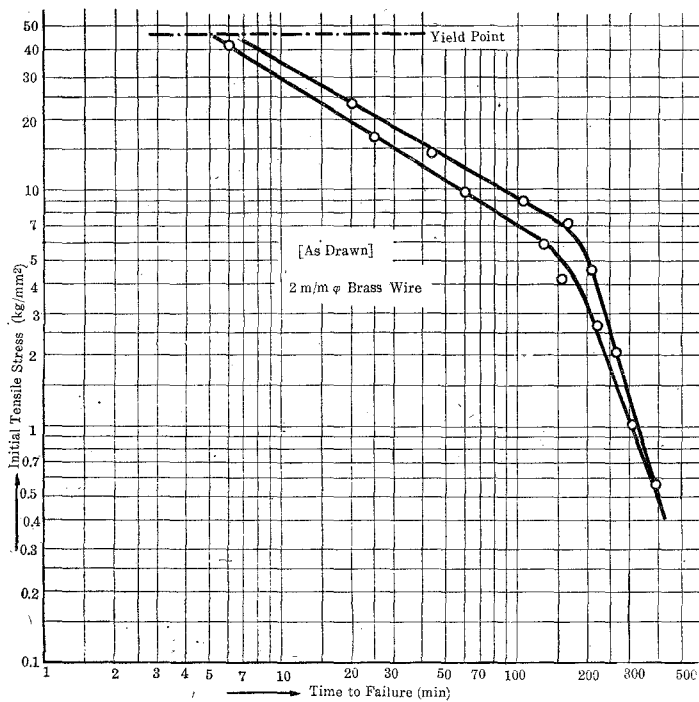
III. 実験結果

捩りによる剪断応力の場合と比較するため先ず引張応力の場合から述べる。

§1. 引張応力による場合

(a) 加工材について

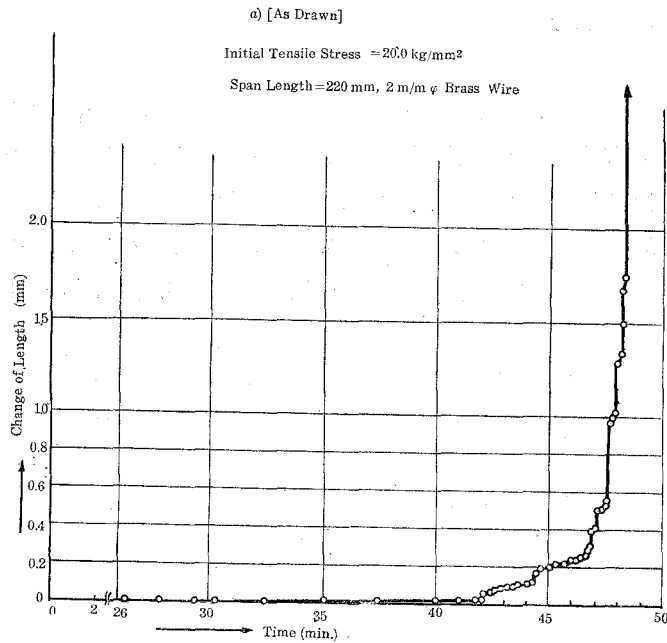
初期応力に対する破断時間の関係を両軸対数表現で示せば第10図の通りである。ここでは 30 kg/mm^2 以上、 0.6 kg/mm^2 以下の初期応力については実測していないが、本測定範囲内では、高応力と低応力では約 8 kg/mm^2 を境界としてその傾向が著しく異なっている。両者ともに大体、直線的に変化していて、高応力の方が低応力にくらべてはるかに応力に敏感であることが判る。前報においても、傾向としては同様であつたが、破断時間が長かつたためか、



第10図 引張応力—破断時間の関係 (加工材)

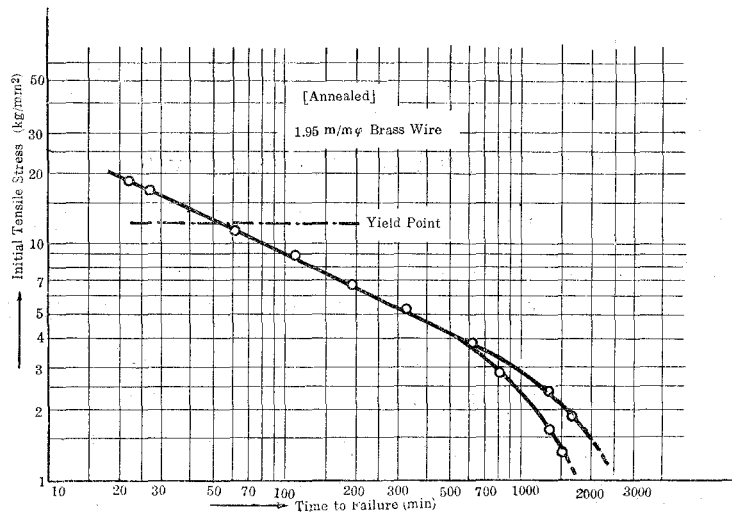
明瞭でなかつた。この臨界応力 (8 kg/mm^2) は先の第1図から見ても降伏点よりはるかに低い応力であるが、応力腐蝕の立場より見て、加工材ではこの応力以上の高い外部応力からは著しく効果が生じて来るものであろう。また低応力において著しく曲線が立つて来ているのは、この図の表現によつて強調されてはおるが、前報においても言及したごとく、加工による残留応力によるものであつて、もしさらに高度に加工されて、その残留応力が増加すれば、この材料は、少し位の外部応力の変化に関係なく一定時間で破断することになる。また、加工度が少なければ、やはり応力腐蝕限が現われることも当然である。

次に破断に到るまでの経過を示すものとして試料の伸びを時間経過に対してプロットすれ



第11図 引張応力による腐蝕破断に至るまでの長さの変化

ば、その一例が第11図であり、その変化は決して連続的でなく階段的に伸びて行くのが見られる。これは亀裂の進行と共に試料の断面縮小と、その亀裂先端における異常に大きな応力集中によるものであることは明らかで、この事は、前報では電気抵抗の変化によつても確認された処である。



第12図 引張応力—破断時間の関係 (焼鈍材)

(b) 焼鈍材について

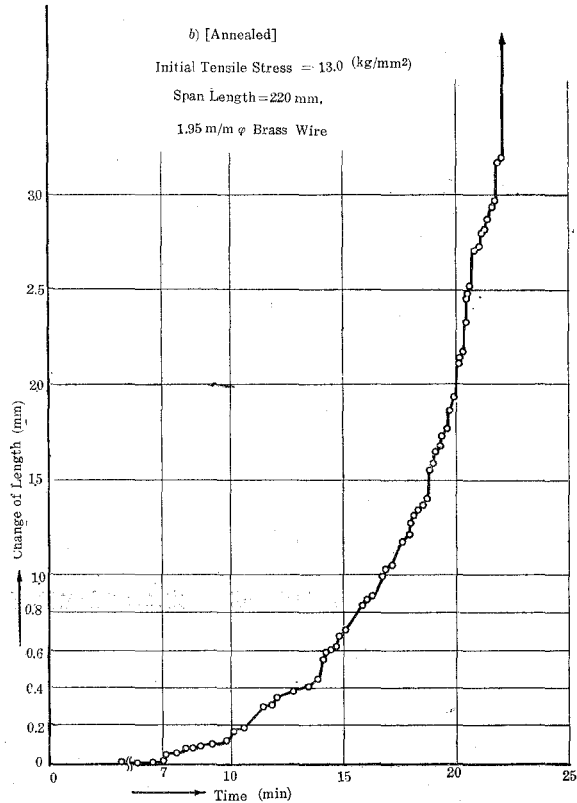
加工材の場合と同様に初期応力～破断時間の関係を示せば、第12図のごとくであつて、この場合は、外部応力の効果が 4 kg/mm^2 まで現われており、 13 kg/mm^2 までには応力腐蝕限が生じていない。とくにまた降伏点においては、前報とことなり、破断時間曲線にクニックが示されず、この点からすれば、 4 kg/mm^2 以上 20 kg/mm^2 までの外部初期応力はすべて応力腐蝕にとっては程度の差でしかないことになる。また、破断に到るまでの伸びを示せば、一例として第13図のごとくである。この場合には、外部荷重が降伏点附近の応力に相当しているため材料のクリープも加算されて、非常になめらかに変化して行くのが見られる⁶。

以上引張の場合における両者の関係を一括図示すれば第14図となり、この場合焼鈍材といえども、空冷等の熱処理から来る影響をも含めて、いまだ、応力腐蝕限が示されなかつた。

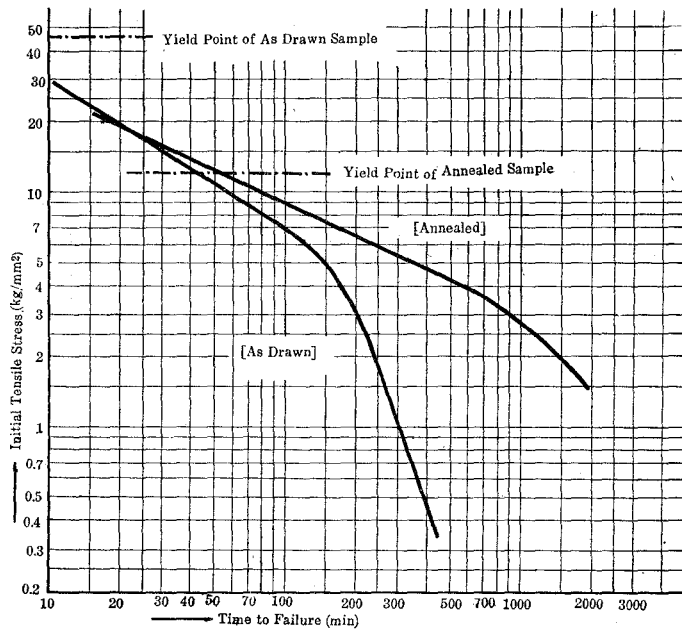
§2. 振りによる剪断応力の場合

(a) 加工材について

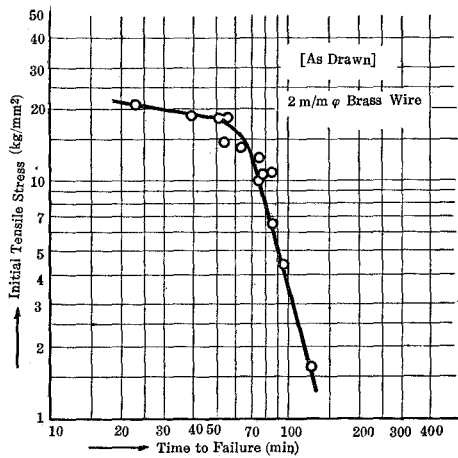
初期応力—破断時間の関係を示すと、第15図のごとくであり、約 15 kg/mm^2 を境界として、この場合も2種の傾向が示される。すなわち、これより高応力では著しく外部応力に敏感であるが、これ以下の応力ではやはり直線的に、しかも外部応力に敏感でなくなる。 20 kg/mm^2 以上では最初から相当振られるため、測定不能である。また、 1.6 kg/mm^2 以下の応力ではデータがないため、いかなる値の応力腐蝕限が存在するか不明である。しかしここに現われているクニックは、先の引張応力の場合と異なり、その応力—歪曲線より見て、いわゆる降伏点に相当するクニックの様に思われ、従つて引抜加工材を用いて振り試験を行なう場合は、残留応



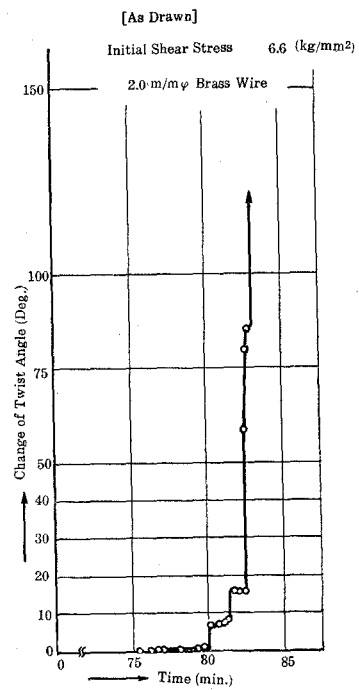
第13図 引張応力による腐蝕破断に到るまでの長さの変化



第14図 引張応力による加工材，焼鈍材の応力腐蝕の比較

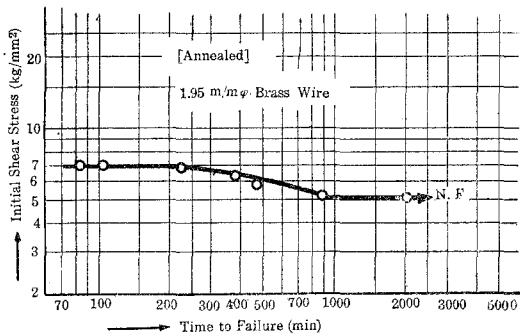


第15図 剪断応力（振り）一破断時間の関係（加工材）



第16図 振り応力による腐蝕破断に到るまでの振り角の変化

力の影響が急激に効果をおよぼすことなく外部応力に平均に加算される様に見える。次に破断に到るまでの捩り角の変化を図示すれば、第16図のごとく、これは低応力の直線部分に相当す



第17図 剪断応力(捩り)—破断時間の関係(焼鈍材)

るが、判然とその変化が不連続であることが判る。

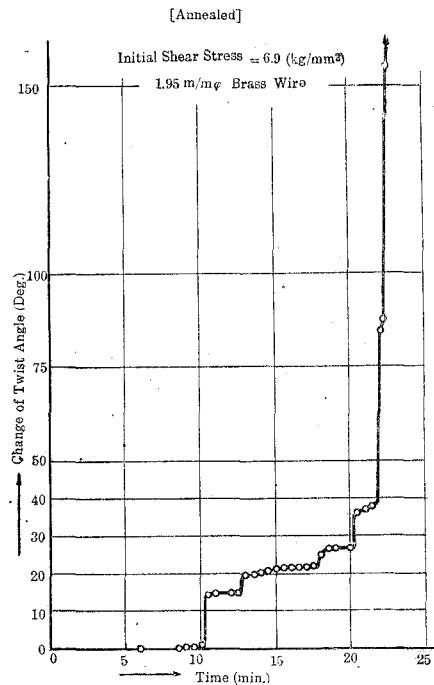
(b) 焼鈍材について

この場合も同様に初期応力—破断時間の関係は、第17図のごとくで、降伏点が大体 6.9 kg/mm^2 であり、この附近では少しの応力減少も著しく破断時間の延長を来すが、この場合特に 5.1 kg/mm^2 では、それ以上の初期応力にくらべて著しく破断時間がのび、2000分でも破断しなかつた。後述の腐蝕組織の顕微鏡観察から、全面腐蝕

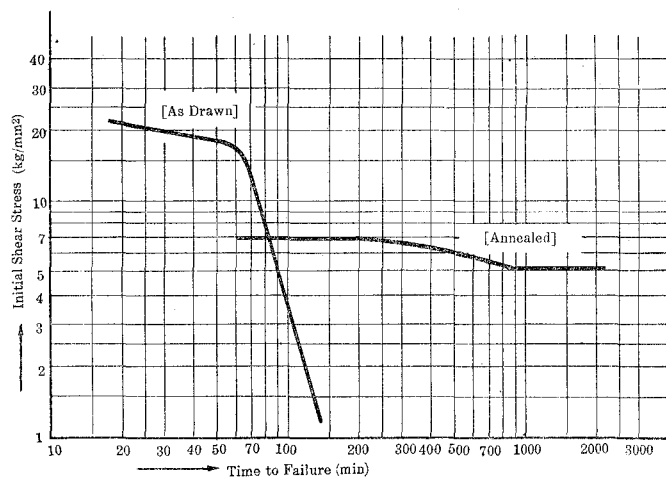
が進行し、また亀裂があつても微少の粒界亀裂のみであるので、これを応力腐蝕限とした。

また、破断に到るまでの捩り角の変化(第18図)も、降伏強度での測定においてさえ、その塑性変化が大きくとも明瞭に階段的に変化している。

以上両種の材料について得られた結果を一括示せば、第19図の通りであつて、この場合



第18図 捩り応力による腐蝕破断に到るまでの捩り角の変化



第19図 捩り剪断応力による加工材；焼鈍材の応力腐蝕の比較

は、引抜加工材の残留応力の有無により非常な差異が破断時間曲線に見られている。

IV. 亀裂組織の顕微鏡観察

加工材；焼鈍材について、両種応力下で破断した試料の亀裂組織を顕微鏡によつて観察した（主として400倍）。その様相たるや、千差万別であるが、その中にもそれぞれに応じて特色が示されているので、その亀裂組織の主なるものの写真を示してその様式の特色をあげれば次の様である。もちろん、ここに示した写真は破断を生ずる原因となつた直接の主亀裂は少なく、別な亀裂であることは、前報と同様である。

§1. 引張応力の場合

a) 加工材について

(i) 先の第10図でクニックよりも高応力の場合には一般にひげ亀裂*が少ないが（写真3～7）、しかし、この範囲でも低応力ほどこれが多くなっている。また大きな亀裂も割合単純で、しかも拡大先端を有している。最初亀裂は粒界から入るが、ついで粒子貫通が混入する。大きな亀裂ほど、そこに粒子貫通の場合が多く見られる。

(ii) 低応力の場合には、ひげ亀裂が非常に発達して来る。しかもこれは表面より幾分中に入つた処で特に発達している傾向が見られる（写真5(a)、写真9(a)および写真10(b); (d)）。

b) 焼鈍材について

(i) 高応力での直線部分（第12図参照）では、外部応力が非常に効果があり、微少の亀裂でも拡大されている。しかも高応力ほど枝亀裂が少ない（写真11～写真15）。又粒界亀裂が僅少で直ちに粒子貫通亀裂に代る。このことは、とくに微少亀裂で終つている様な場合でもそうである（写真13～15）。また粒子貫通の場合には粒子の方向性がなく（写真11）、また拡大の行なわれた亀裂には、必ず不連続な階段状亀裂が伴う（写真14の左下側）。これは加工材では明瞭に見られた現象である（写真5(b)）。結晶面亀裂は微少現われている（写真13(a)）が、加工材にくらべては無視出来るほどである。

(ii) 低応力の破断曲線の弯曲部分に相当する応力では、粒界亀裂範囲が大となるが、一方表面から貫通する場合も混在する（写真18）。

とくに 1.3 kg/mm^2 では写真19に見るごとく、全面腐蝕の様相が濃く、微少の粒界亀裂があるにすぎない。これ以下の応力での測定は行なわなかつたが、応力腐蝕限に近いことが予想される。従つて、破断の箇所のみが、とくに応力集中によつて腐蝕亀裂を生じて破断したものであるう。

* 粒内の結晶面および双晶面での亀裂が主亀裂とある角度をなして生ずるが、その数が多くなるとひげの様に見えるため、これらを総称してひげ亀裂となすける。

§2. 振りによる剪断応力の場合

a) 加工材について

(i) 12.5 kg/mm^2 より高応力の場合：高応力ほど亀裂の拡大が著しく見られ、しかも、枝亀裂は少なく、かつその数も非常に少なく(写真 20~23)、低応力になるほど、枝亀裂が多くなつて来る。大きな亀裂ほど最初からある角度をなして侵入している(写真 22; 写真 24)。

一般的には最初は粒界亀裂で、ついで粒内亀裂が混在し、さらに結晶面に無関係な亀裂の進行が示されている(写真 24(a))。しかし、この場合でも微細ながら、階段的亀裂で進行することは写真 25(c); (d) および (e) に見られる通りである。

結晶面亀裂は低応力ほど大である。また大きな亀裂ほど多数見られる(写真 24(a))。また亀裂の入口は割合に単純でも、ある程度内部に侵入すると枝亀裂が増加する(写真 23(a))。

(ii) 12.5 kg/mm^2 より低応力の場合：低応力ほど、亀裂は狭い。入口が単純でも中に入ると枝亀裂が増加している(写真 26~28)。この場合も亀裂の侵入様相は先の引張応力の場合と似ているが、とくに注目すべきことは、大きな亀裂では、最初微小の傾斜で表面から侵入した場合でも、ある程度内部に入ると急激にその傾斜を増す(写真 26; 写真 28)。もちろん、高応力ほど、表面近くから屈曲を生ずる。

一般的にひげ亀裂は引張応力の場合ほど多くない。

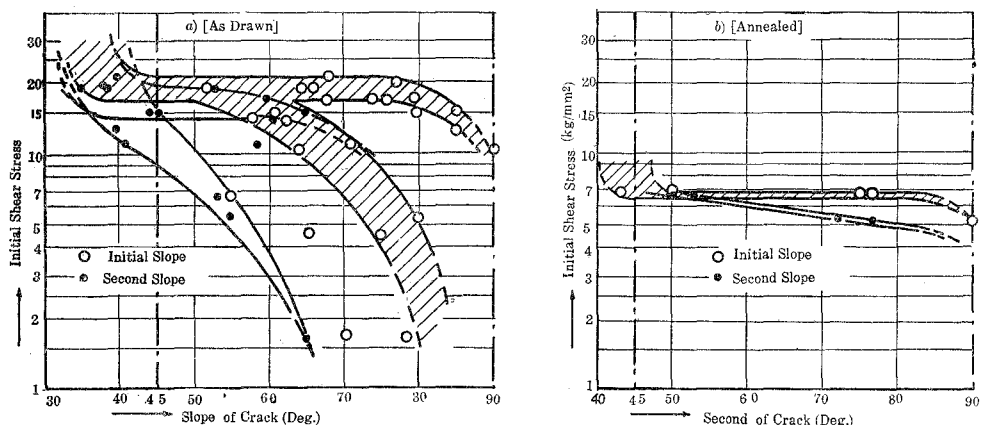
b) 焼鈍材について

低応力の場合にその亀裂拡大が小であり高応力の場合にはそれが大であることは、加工材とその様相が異ならないが、一般にその数は少ない。亀裂の様相もまた他の場合と変るところがないが、しかし、大きな亀裂から派生するひげ亀裂はほとんど見られない(写真 31~35)。亀裂の巨視的方向は、写真に示してある通り、最初からある角度をなしている。

破断にまで到らなかつた試料についてその組織を見ると、写真 36 のごとく、全面的に粒界亀裂のみが見られ、この程度までの腐蝕に 2000 分を要している。これを応力腐蝕限の応力とした。

§3. 振り剪断応力と亀裂方向の関係について

先の §2. にのべたごとく、とくに振りによつてその巨視的亀裂方向が色々とその大きさを異にし、さらにまた、試料内部においても急にその方向が変化することが見られたので、これら試料の研磨面に現われた亀裂はほとんど写真撮影をし、その亀裂方向を実測した結果を示せば、第 20 図の通りである。ここで(a); (b) とともに、横軸に亀裂の巨視的角度(試料の中心軸に対する角度をもつて表わす)をとり、縦軸は初期剪断応力をとつた。この図で白丸印は最初の亀裂方向であり、黒丸印は試料内で変化した第 2 の亀裂方向を示している。これによれば、加工材では大体 12 kg/mm^2 を境として低応力では 1 種のみ亀裂しか見られず、それらが内部に



第20図 外部剪断応力に対する亀裂方向の変化

侵入して第2の方向をとるに對し、高応力では亀裂の数が増加することにもよるが、また新しい方向の亀裂が新しく加わっていることがわかる。

これに對して、焼鈍材では、応力腐蝕限が大なるため、この区別は明らかではないが、1種類の亀裂様式しか見られていない。

ここでさらに注目すべきことは、加工材では最小傾斜角が 35° までに到っていることである。これらについて2~3の考察を行なつてみよう。

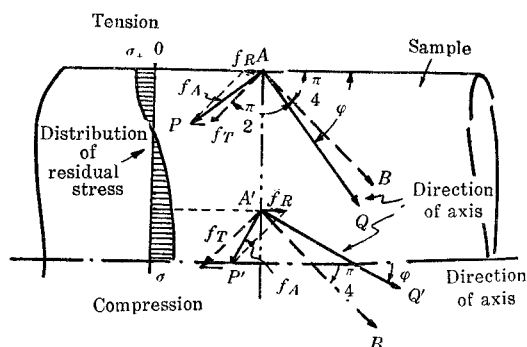
一般に本研究に使用した黄銅線は、その引抜き加工により、試料表面附近には引張応力、内部には圧縮応力が残留しておくことは、G. Sachs 等の指摘している処である⁷が、その正確な値が今の処不明であるにしても、これらの残留応力が腐蝕亀裂方向に影響を与えていると考えてよいであろう。

A. Morris⁸の論文にも見られる通り、丸棒試片に捩りによる剪断応力を与える時、外周で最大であり、その垂直断面上にあるばかりでなく、軸方向にも、大いさがそれと同一でモーメントの向きが逆な剪断応力があり、さらに、棒の軸方向と 45° の傾きを有する面上には、剪断応力と同大の引張または圧縮応力が生じている。従つてこれら両者の合成を簡単に2次元的にのみ考えると、次の様になる。今第21図で、試片表面に残留応力等が存在しなければ、 \vec{AB} の方向に亀裂が入る(軸に對して 45° をなす)。これに今表面に引張応力 f_R が残留しておるとすれば、外部からの剪断応力 f_T に等しい引張応力とが合成され、 f_A の大いさとなり、またその亀裂方向も、これと垂直な \vec{AQ} の方向となろう。従つて、 f_R に對して、 f_T の大小によつて、その亀裂方向(φ)が $\pi/4 \sim \pi/2$ の間を変化することになり、唯今の試料では、最初低応力ではその亀

7 G. Sachs: "Handbuch der Metall Physik, Bd. III, S. 204.

8 A. Morris: 前掲脚註2) 参照.

裂方向が $\pi/2$ に近いが、段々と高応力になると $\pi/4$ に近づく。また最初低応力で $\pi/2$ に近い角度で進入した亀裂も、残留応力の種類が今度は圧縮となること、および、試料断面縮小による応力集中が加算されて、急激にその方向が $\pi/4$ となるものである。しかし、残留応力から $\pi/4$ よりも小となることも考えられる（同図の下方に示した $\vec{A'Q'}$ が亀裂方向）。



第21図 試料の残留応力による亀裂方向の変化

外部からの剪断応力が大となつて来ると、まず、その表面層から降伏する（塑性変形する）。かくのごとく段々と内部まで塑性変形を行なえば、たとえ、最初引抜加工による特定の残留応力が存在していたとしても、また新しい立場の状態になるであろう。かかる見地からすれば、第20図の $11 \sim 12 \text{ kg/mm}^2$ の応力以上で2種の亀裂方向が同時に示されるのは、大亀裂の間の領域で応力除去によることも含まれようが、先の説明によつて引抜加工の残留応力が消失するためでもあろう。焼鈍材においては、その応力範囲が狭いが、加工材の高応力での関係と同等な立場を示していると考えられる。

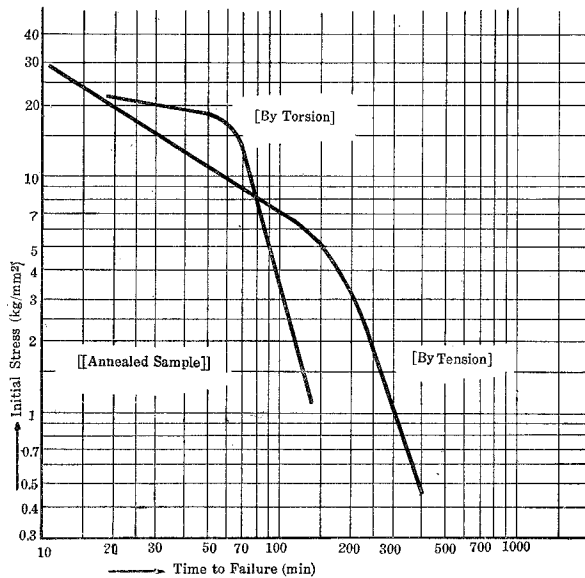
§4. 結晶粒子内の亀裂方向に関する考察

この事に関しては、前報に引張応力の場合について、定性的に論じたが、振りによる剪断応力の場合においても、同様のことが見られる。すなわち、巨視的には応力の性質に差異があつても、結晶粒子個々については、各写真に見られるごとく、大差なく、すでにのべた通り、粒子に対する切欠応力集中効果；主応力効果および結晶面効果が、色々と関連し、それらの大小に応じて複雑な亀裂様相を示すものである。

V. 総 合 考 察

引抜加工材について、振りによる剪断応力；引張応力の両者による破断曲線をそれぞれの初期応力を一致させて示せば、第21図のごとくなり、一方焼鈍材についても両者を比較すれば第22図の如くなる。

焼鈍材においては、降伏点以下の応力の場合を比較すると、振りによる場合の方がはるかに破断時間が長い。そして、応力腐蝕限が現われているが、一方引張応力の場合にはより早く破断している。この事は一般に、振りによる方が腐蝕亀裂の直接の開口が少ないため、その破断に対する効果が稀薄になるためであろう。すなわち、剪断応力は丸棒の表面における値であつて、それより内部では、少ない応力が生じているから、たとえ亀裂による応力集中があつて



第22図 加工材の各種応力による応力腐蝕の比較

引抜加工の影響が一応消失すると考えてよからう。一方低応力で、引張応力の場合よりも異常に早く破断することは、その亀裂組織から見られるごとく、振りの場合の方が結晶面亀裂が少ないことより考えて、振り応力によつて、その亀裂先端での応力集中がかえつて大であることによるものであろう。

VI. 要 約

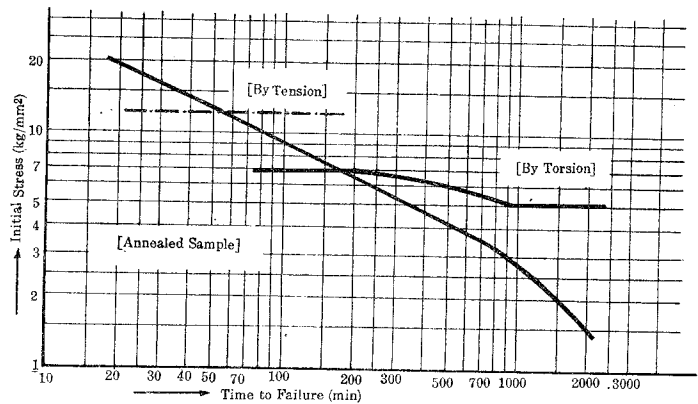
以上の諸考察を要約すると次の通りである。

1) 市販 α 黄銅線 (2 m/m ϕ) をアムモニアガス；

酸素ガスおよび水蒸気の流動ガス雰囲気中で振りによる剪断応力腐蝕を行なつた結果、市販の引抜き加工のままの状態では、非常に短時間で破断し、降伏点と見られる初期応力で破断曲線が急激に彎曲し、これより低応力では測定最小初期応力まで直線的に破断時間が変化した (両軸対数表現)。一方焼鈍材では 5.1 kg/mm² で応力腐蝕限が現われた。

も、引張応力の場合よりは、亀裂の前進によつても急激な増加がないことになるからである。これは破断までの時間的变化を示す第13図と第18図を比較することによつて了解出来る。もちろん、この場合には、先の焼鈍処理からの効果も加わつていると考えてよいであろう。

しかし引抜加工材の場合には、第22図に見られる通り、高応力では振りの場合が破断までに長時間を要するが、低応力ではかえつて、引張りの場合よりも早く破断している。高応力で、振りにおける降伏点を越える場合は、先の第20図からも見るごとく、



第23図 焼鈍材の各種応力による応力腐蝕の比較

2) 亀裂の進行様式は前報でのべたこととほとんど同様であるが、その巨視的亀裂方向は兩種の材料に特有の変化を示している。すなわち、焼鈍材では、最初表面附近で粒子境界亀裂が見られるが、ついでこれらが集まつて単純な、ある一定方向(試片軸に対して約 75°)をなす亀裂(主として粒子貫通)となり、続いて、約 45° の角度の亀裂となる。

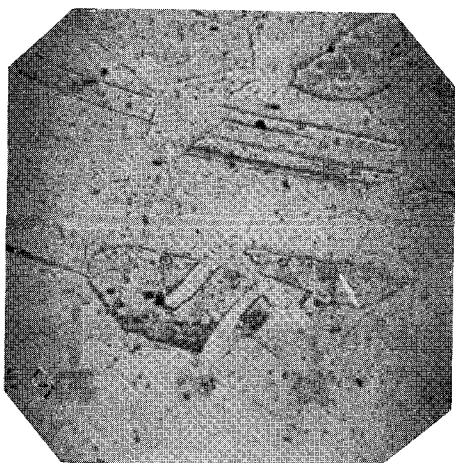
しかしながら、引抜加工材では剪断応力が $11\sim 12\text{ kg/mm}^2$ までは亀裂の始まりはほとんど粒界で行なわれ直ちに粒子貫通に変るが、その方向は試片表面に垂直なものか、大体 $70\sim 80^\circ$ の角度で入る亀裂が見られるが、 10 kg/mm^2 以上では、ふたたび亀裂の数が多く、かつ垂直亀裂が増加する。しかして、試片の中心近くでは約 40° の亀裂方向となる。これは、引抜加工材の残留応力と外部応力との総合効果として説明される。

3) これを引張応力腐蝕の場合と比較するに、焼鈍材では振りの場合が破断に長時間を要するに反し、引抜加工材では、振りの場合の方が低応力で早く破断する。

従つて比較試験の場合には、引抜加工材およびその焼鈍材については、振りによる剪断応力下での試験の方が明瞭な結果を得ることが出来る。

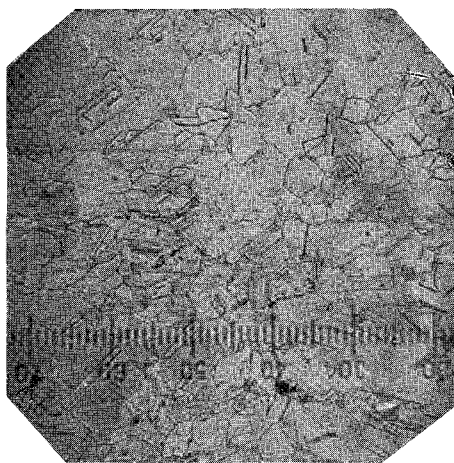
終りに、本研究に関して、いろいろと御教示を賜つた北大教授幸田博士に深甚なる謝意を表すると共に、実測に当つて援助を惜しなかつた工学士田中弘史君、ならびに当研究室の皆様にも厚く感謝する次第である。

(昭和32年4月30日受理)



× 440

写真 1 試料標準組織 (引拔加工材)



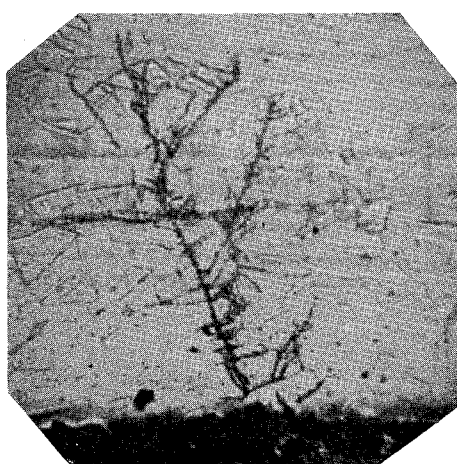
× 305

写真 2 試料標準組織 (焼鈍材)



(a)

× 440



(b)

× 440

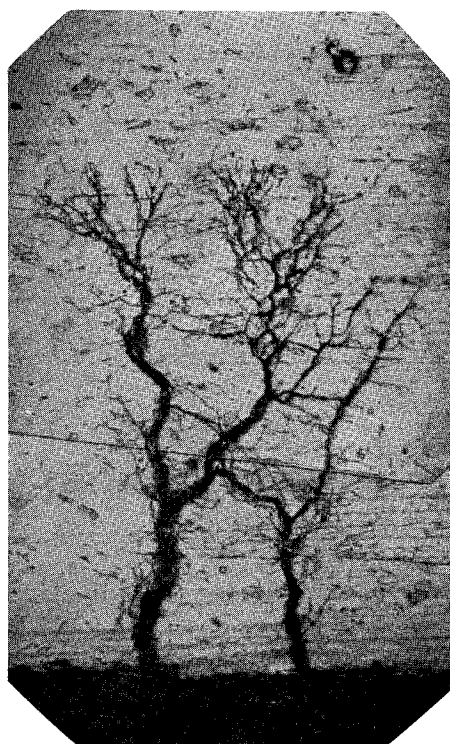
写真 3 加工材

引張応力=41.4 kg/mm²

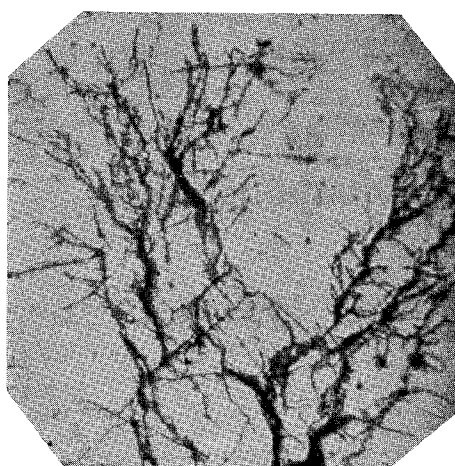
破断時間=6.5 min

(a) 亀裂拡大

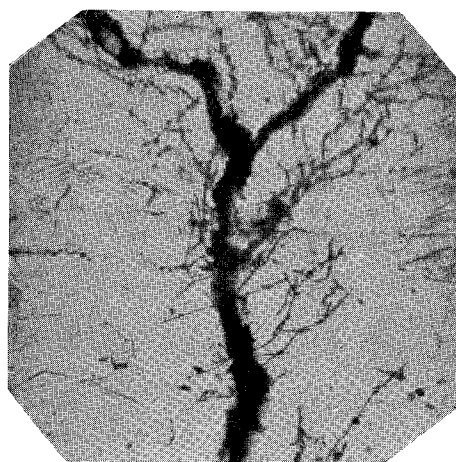
(b) 他の微小亀裂



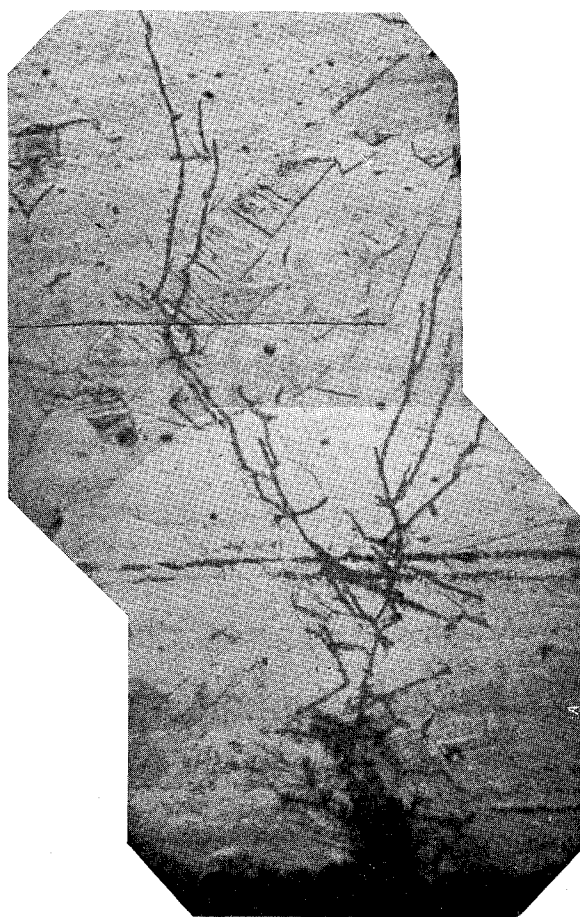
a) × 440



(b) × 440



(c) × 440



(d) × 440

写 真 4 加 工 材

引張応力 = 23.3 kg/mm²

破断時間 = 20 min

(a) 亀裂拡大

(b) } 同上拡大 (部分)

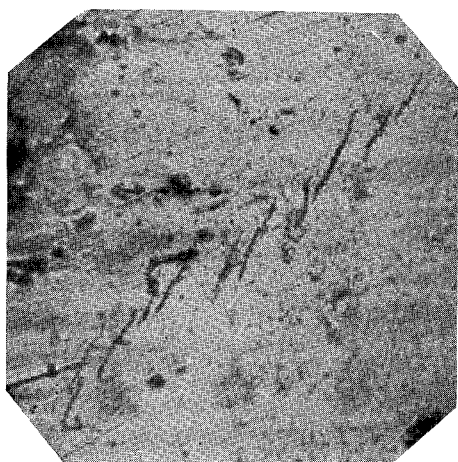
(c) }

(d) 別の亀裂

双晶通過の様式



(a) × 440



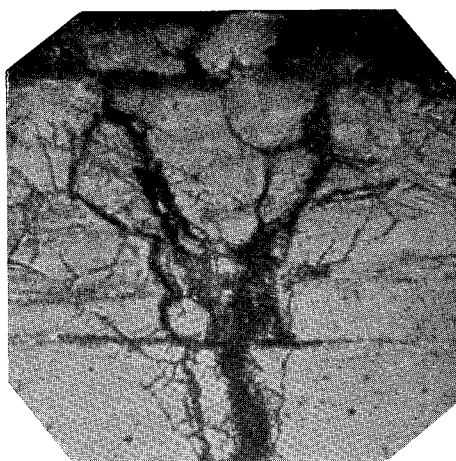
(b) × 440

写真 5 加工 材

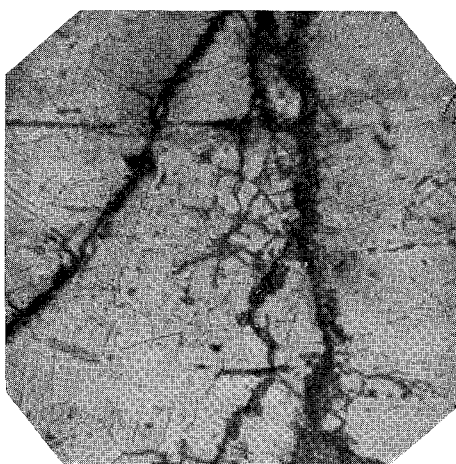
引張応力 = 16.95 kg/mm²

破断時間 = 25 min

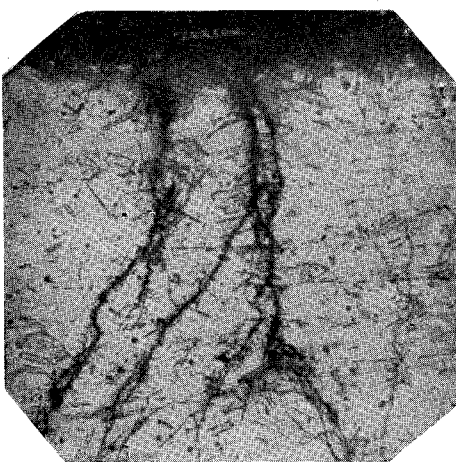
- (a) 表面附近での結晶面亀裂
 (b) 階段状亀裂 (これはとくに破断に到った主亀裂の附近に多い)



(a) × 440



(b) × 440



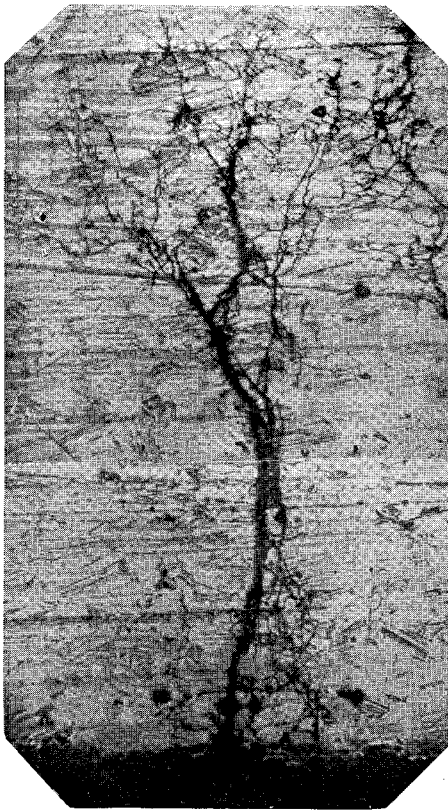
(c) × 140

写真 6 加工 材

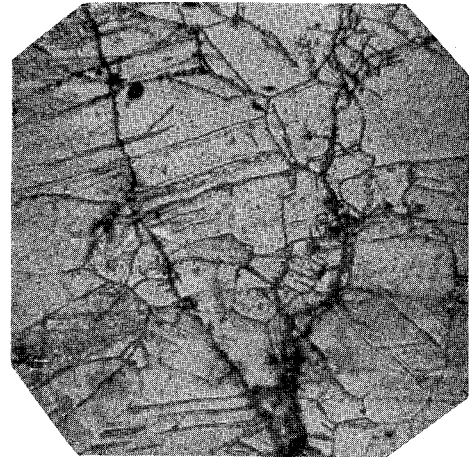
引張応力 = 9.68 kg/mm²

破断時間 = 60 min

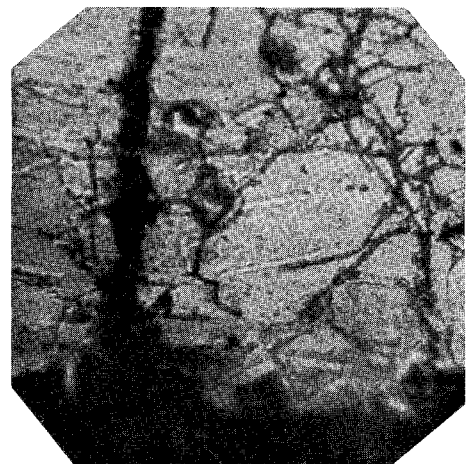
- (a) } 同一亀裂
 (b) }
 (c) 結晶面亀裂 (a), (b) の縮小



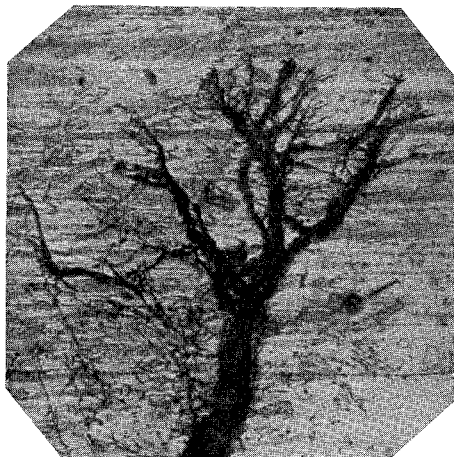
(a) × 140



(c) × 440



(d) × 440



(b) × 140

写 真 7 加 工 材

引張応力 = 8.87 kg/mm²

破断時間 = 107 min

(a) 亀裂の進行様式 (拡大を示す)

(b) 亀裂拡大 (別の亀裂)

(c) } (a) の拡大 (部分)

(d) } 結晶面亀裂少しあり

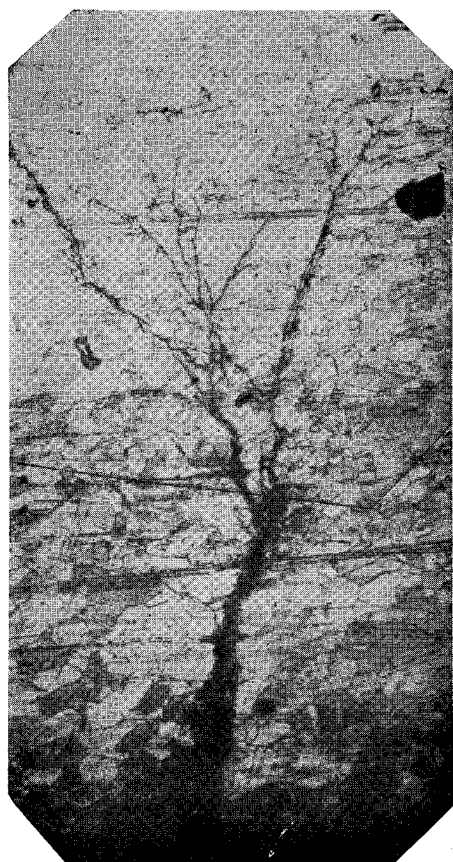
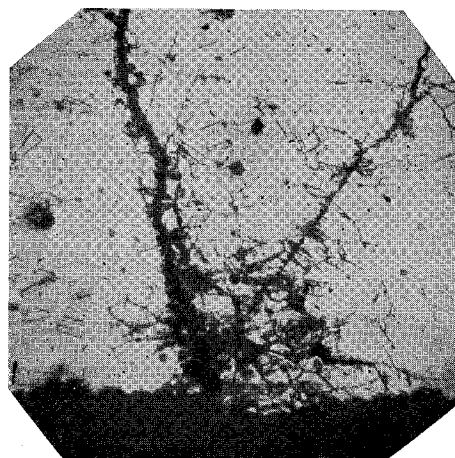
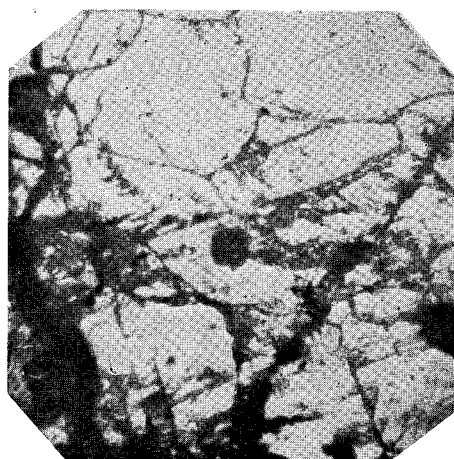
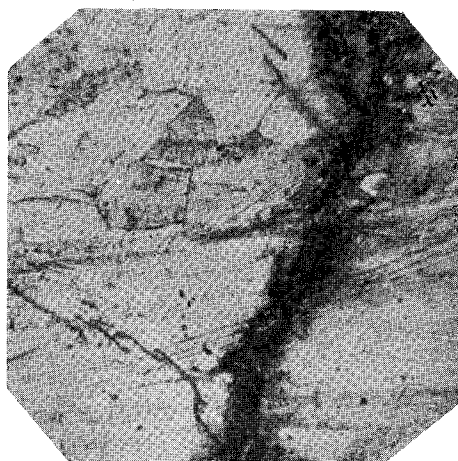
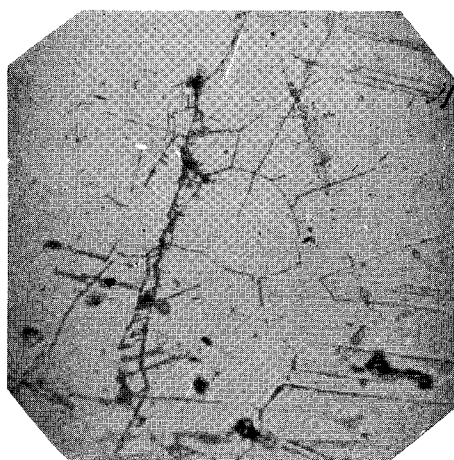
(a) $\times 140$ (a) $\times 140$ (b) $\times 440$ (b) $\times 440$ (c) $\times 440$

写真 8 加工材

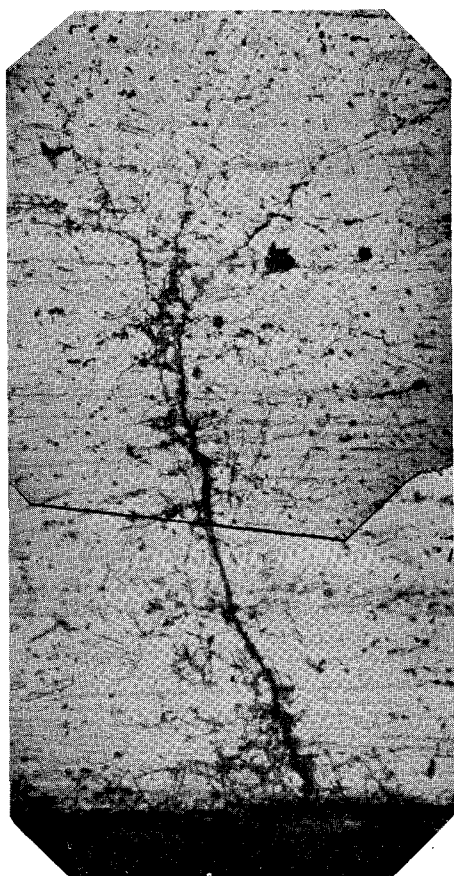
引張応力 $=4.16\text{ kg/mm}^2$ 破断時間 $=151\text{ min}$

- (a) 亀裂拡大, 枝亀裂少し
 (b) 同上拡大, 階段亀裂あり

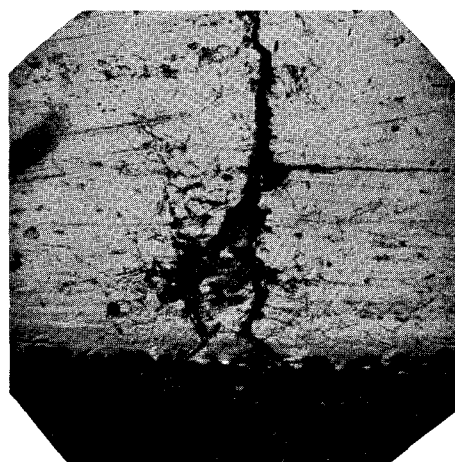
写真 9 加工材

引張応力 $=2.03\text{ kg/mm}^2$ 破断時間 $=235\text{ min}$

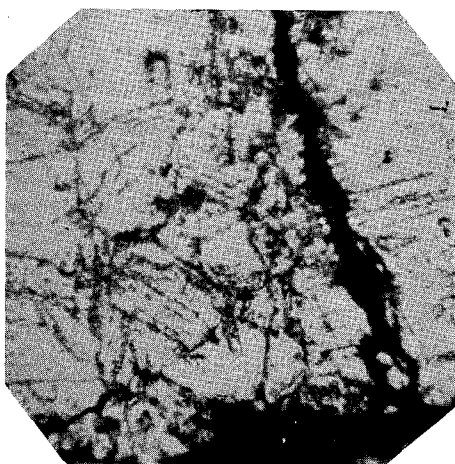
- (a) 結晶面亀裂大
 (b) 同上拡大
 (c) 中央部の枝亀裂



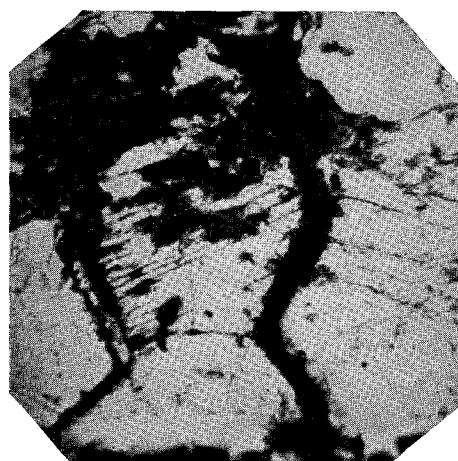
(a) $\times 140$



(c) $\times 140$



(b) $\times 440$



(d) $\times 440$

写 真 10 加 工 材

引張応力 $=0.509 \text{ kg/mm}^2$

破断時間 $=480$ 分で中止

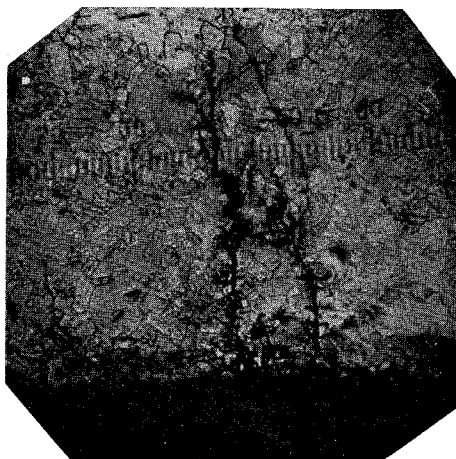
- (a) 亀裂全図
- (b) (a) の拡大 (亀裂入口附近)
- (c) 入口の複雑な亀裂
- (d) (c) の拡大



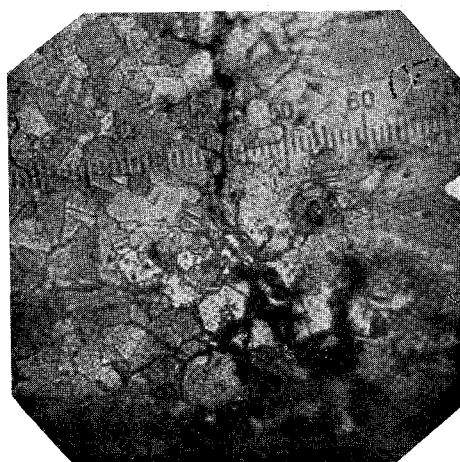
× 305

写真 11 焼 鈍 材

引張応力 = 18.75 kg/mm²
破断時間 = 22.5 min



(a) × 93



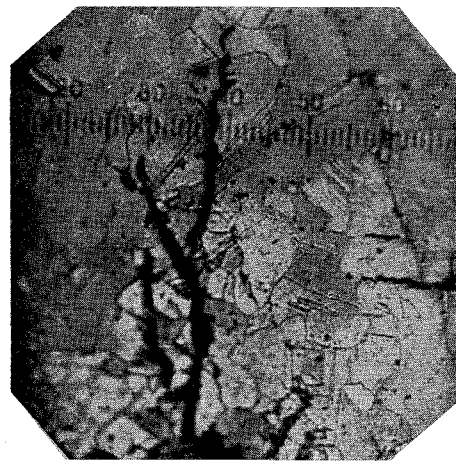
(b) × 305



× 305

写真 12 焼 鈍 材

引張応力 = 17.12 kg/mm²
破断時間 = 27 min
亀裂拡大を示す。



(c) × 305

写真 13 焼 鈍 材

引張応力 = 8.93 kg/mm²
破断時間 = 110 min

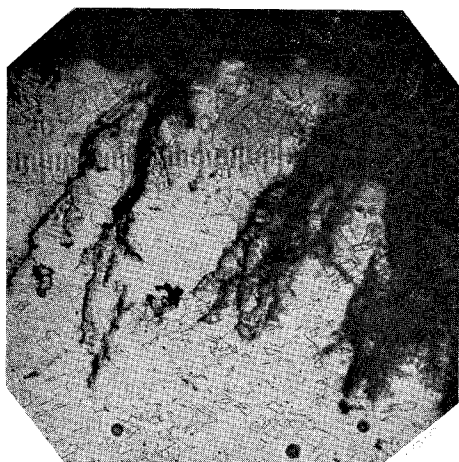
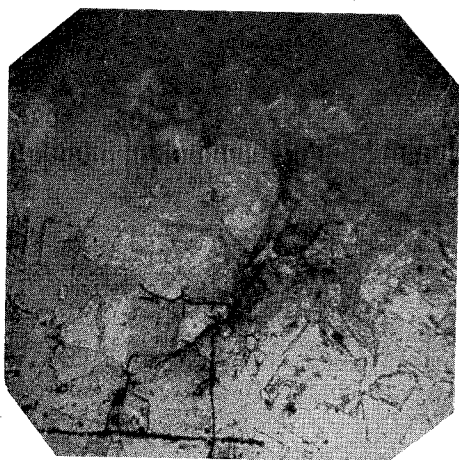


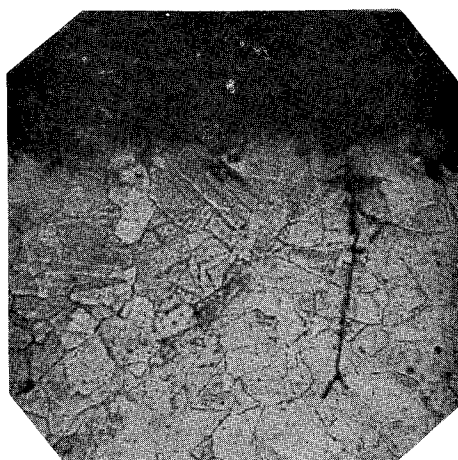
写真 14 焼 鈍 材 $\times 95$
引張応力 = 6.7 kg/mm^2
破断時間 = 192 min



写真 15 焼 鈍 材 $\times 305$
引張応力 = 5.24 kg/mm^2
破断時間 = 333 min



$\times 305$
写真 16 焼 鈍 材
引張応力 = 3.865 kg/mm^2 破断時間 = 623 min



$\times 305$

試片の
表面位置
↓



写真 19 焼 鈍 材 $\times 305$
引張応力 = 1.312 kg/mm^2 破断時間 = 1500 min
主として全面腐蝕 (境界亀裂が微小あり)

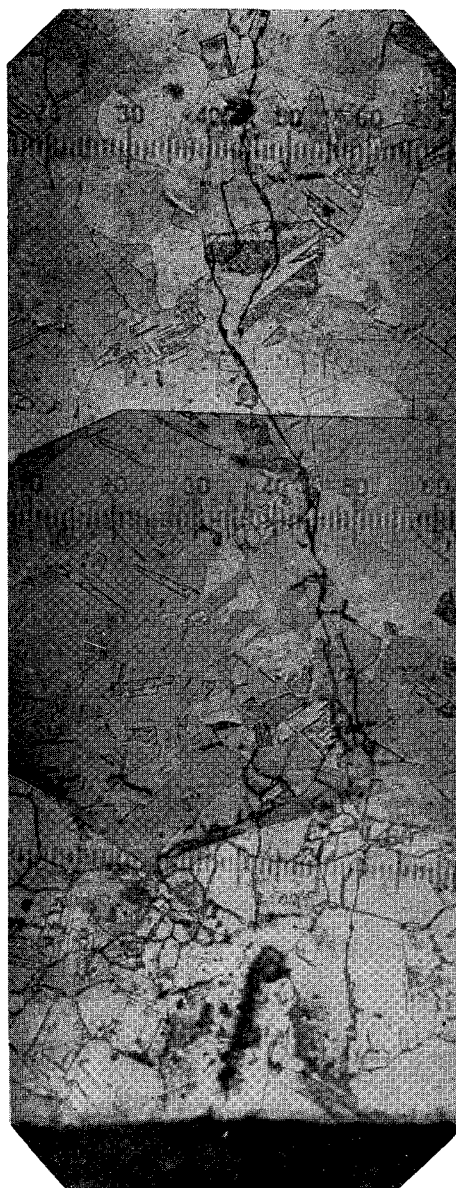


× 305

写真 17 焼 鈍 材

引張応力 = 2.37 kg/mm^2

破断時間 = 1354 min



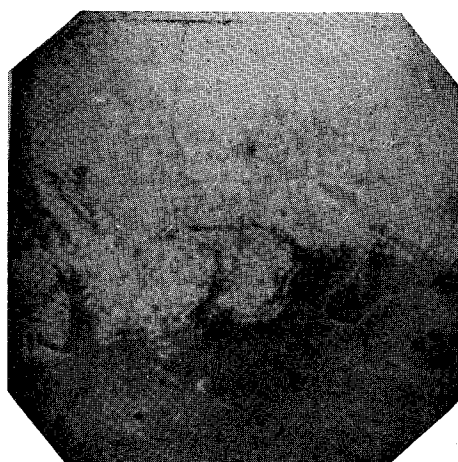
× 305

写真 18 焼 鈍 材

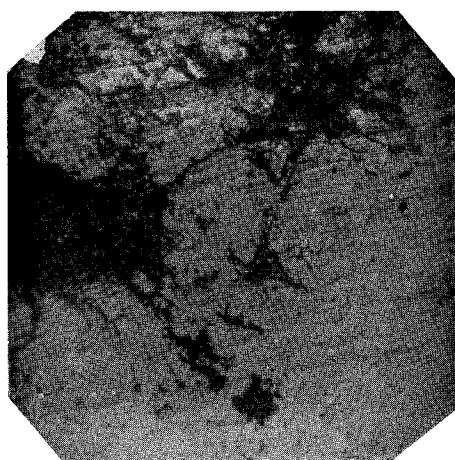
引張応力 = 1.875 kg/mm^2

破断時間 = 1640 min

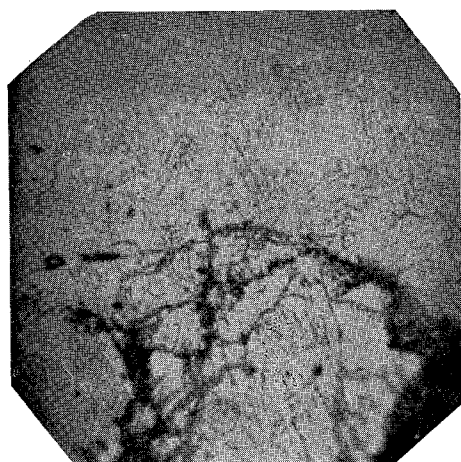
表面附近は粒界亀裂であることを示す。



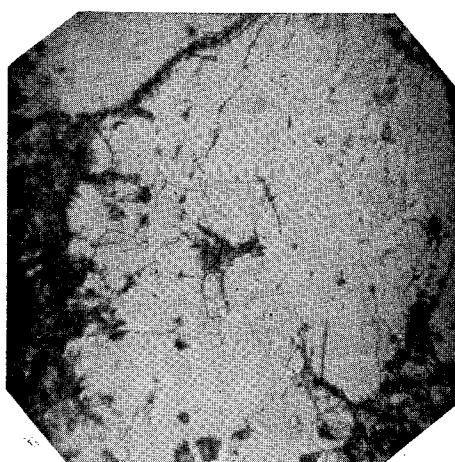
(a) × 140



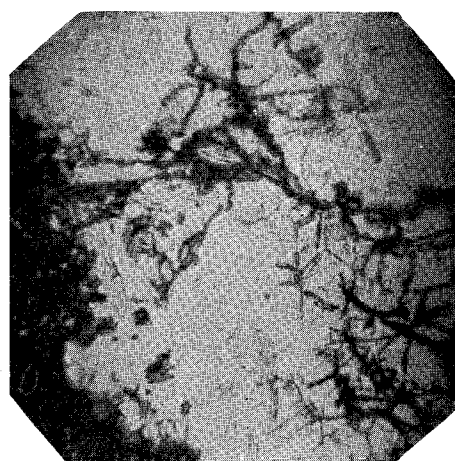
(c) × 140



(b) × 440



(d) × 440



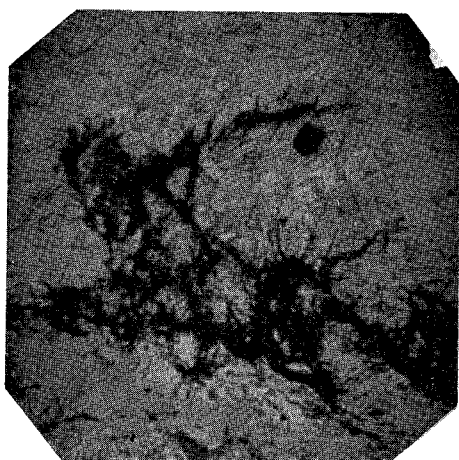
(e) × 440

写真 20 加工材

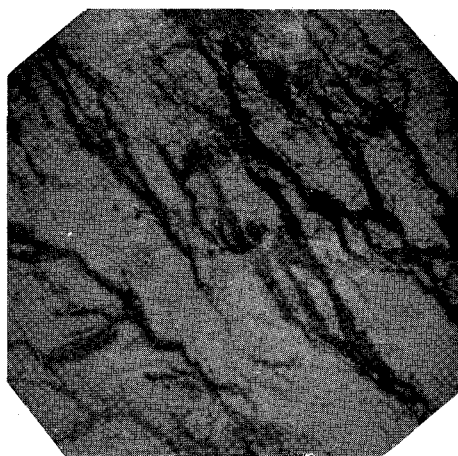
剪断応力=21.1 kg/mm²

破断時間=22.5 min

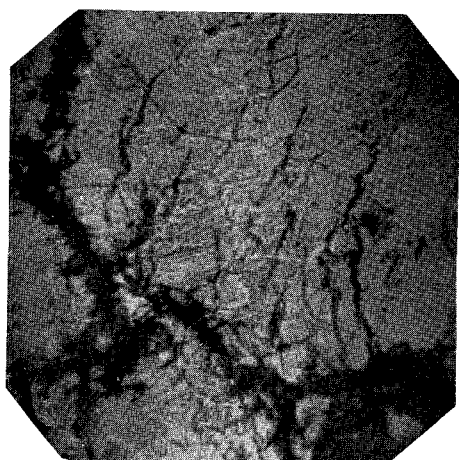
- (a) 亀裂拡大
- (b) 同上拡大, 塑性変形を示す
- (c) 主亀裂部分
- (d) 同上拡大
- (e) 主亀裂, 他の部分



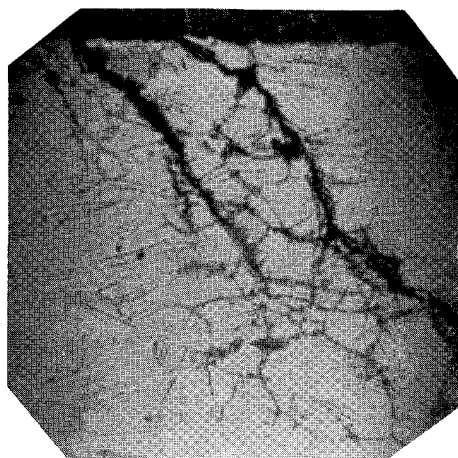
(a) × 140



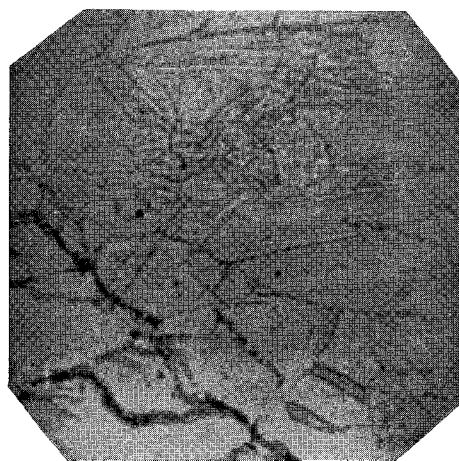
(a) × 140



(b) × 440



(b) × 440



(c) × 440

写真 22 加工材

剪断応力 = 18.6 kg/mm²

破断時間 = 50 min

(a), (b) 共に最初から傾斜した亀裂,

(b) は 55°, 内部では 35°

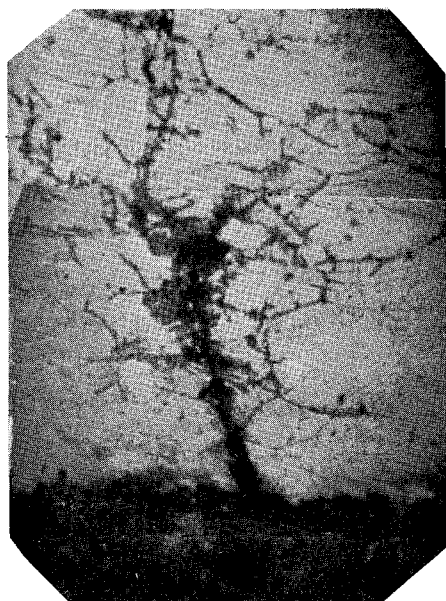
写真 21 加工材

剪断応力 = 19.0 kg/mm²

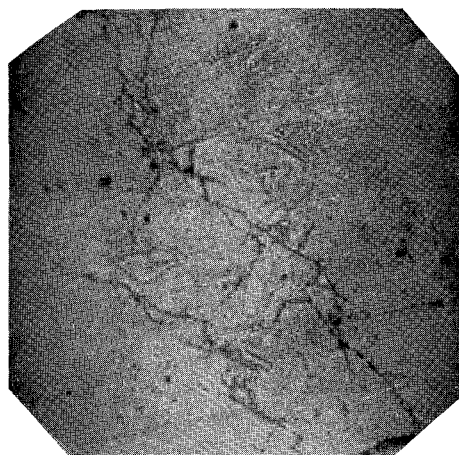
破断時間 = 39 min

(b) は (a) の拡大主亀裂よりの枝亀裂を示す

(c) 他の亀裂



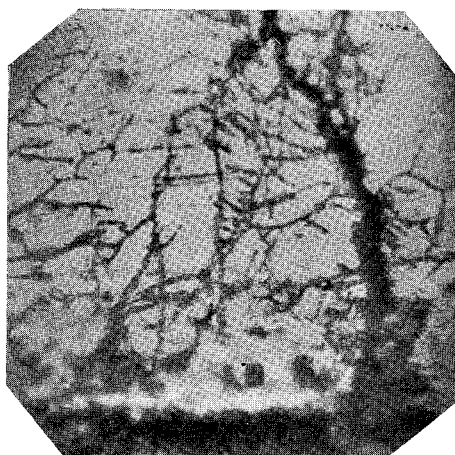
(a) $\times 440$



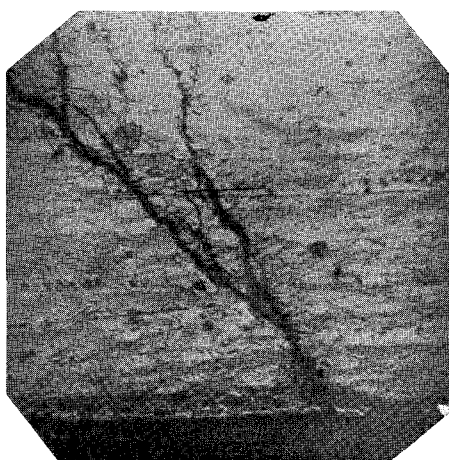
(b) $\times 440$



(c) $\times 440$



(a) $\times 440$



(d) $\times 140$

写真 24 加工材

剪断応力 = 14.9 kg/mm^2

破断時間 = 53 min

(a) 結晶面亀裂現われる

(b) 傾斜 45° , 60°

写真 23 加工材

剪断応力 = 16.8 kg/mm^2

破断時間 = 59 min

(a) の傾斜 74°

(b) 塑性変形を示す (主亀裂部分)

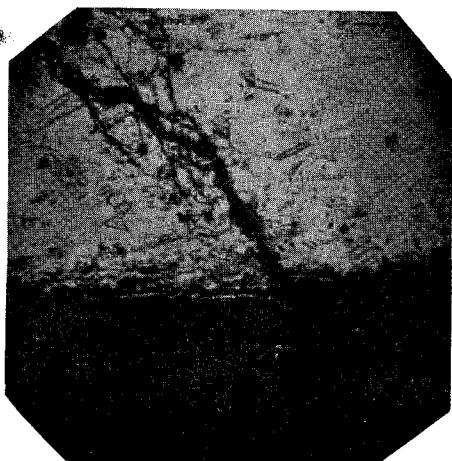
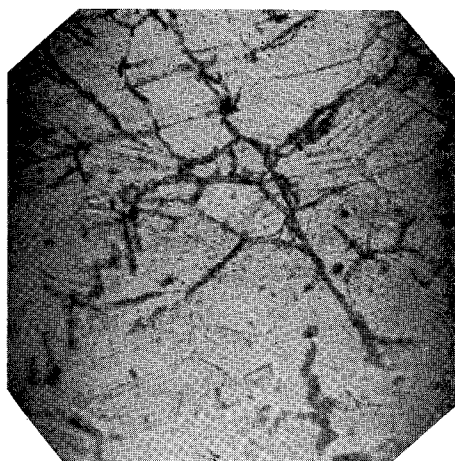
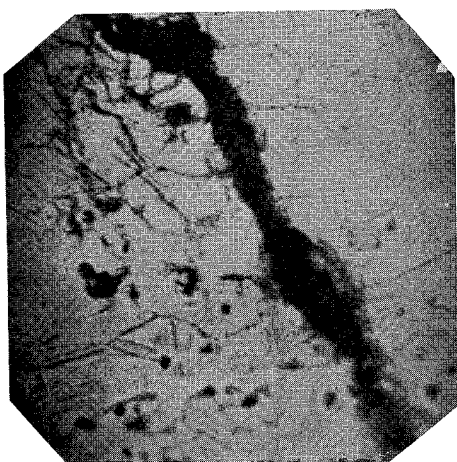
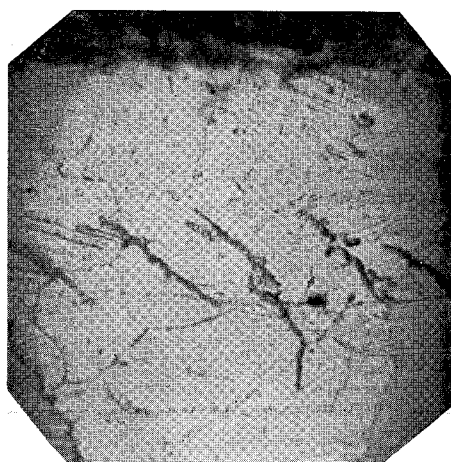
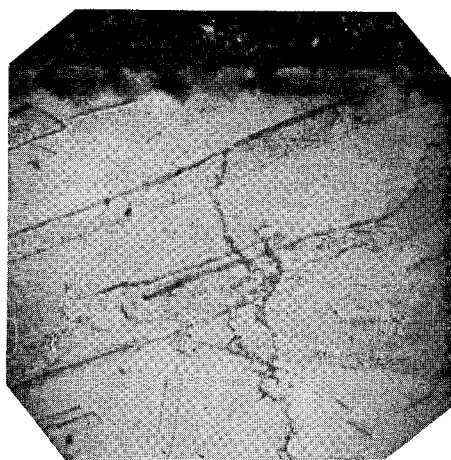
(a) $\times 140$ (c) $\times 444$ (b) $\times 440$ (d) $\times 444$

写真 25 加工 材

剪断応力 = 13.9 kg/mm^2

破断時間 = 63 min

- (a) 傾斜 62°
- (b) 同上拡大
- (c) 試料中央の亀裂, 階段状亀裂
- (d) とびとびの亀裂, 傾斜 38°
- (e) 双晶面での亀裂 (表面附近)

(e) $\times 444$



× 140

写真 26 加工材

剪断応力 = 12.5 kg/mm²

破断時間 = 75 min

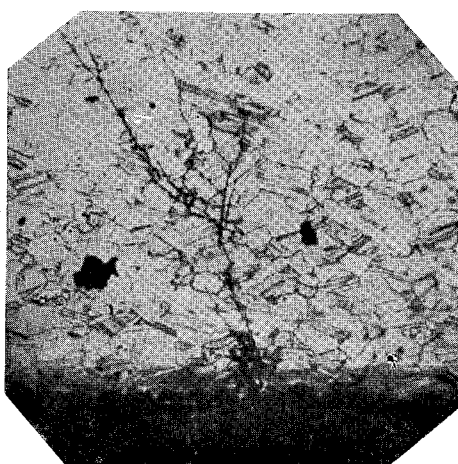
表面附近の傾斜: 85°

内部での傾斜: 40°



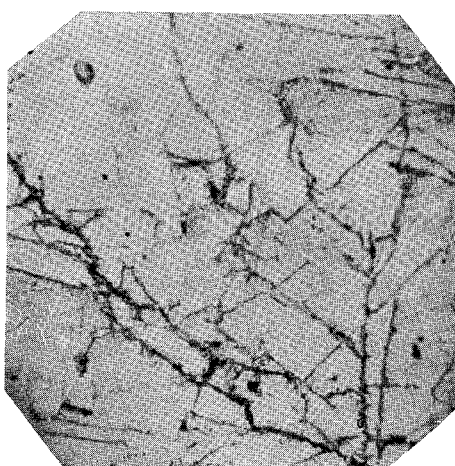
(a)

× 440



(b)

× 140



(c)

× 440

写真 27 加工材

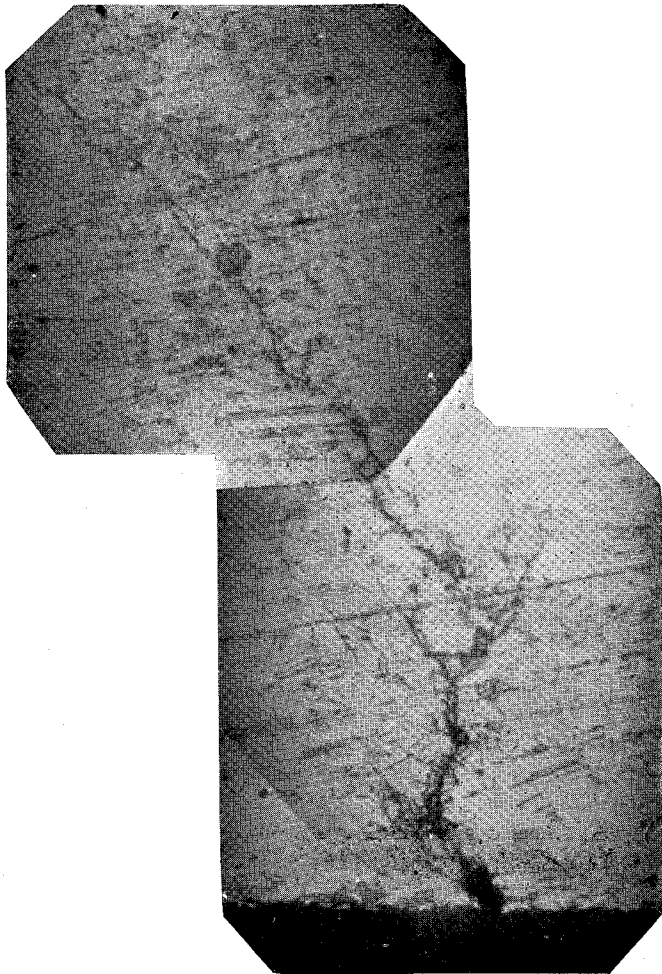
剪断応力 = 11 kg/mm²

破断時間 = 84 min

(a) 双晶貫通亀裂

(b) 傾斜: 60°; 71°

(c) 同上拡大



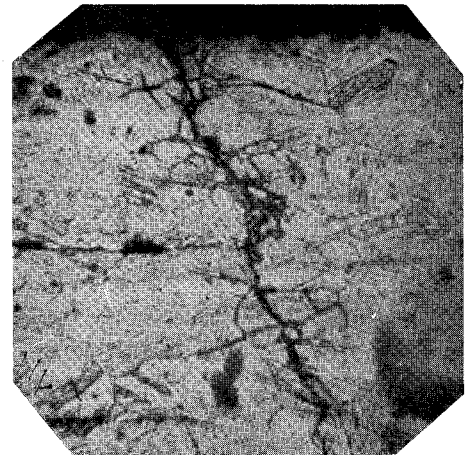
× 140

写真 28 加工材

剪断応力 = 6.6 kg/mm^2

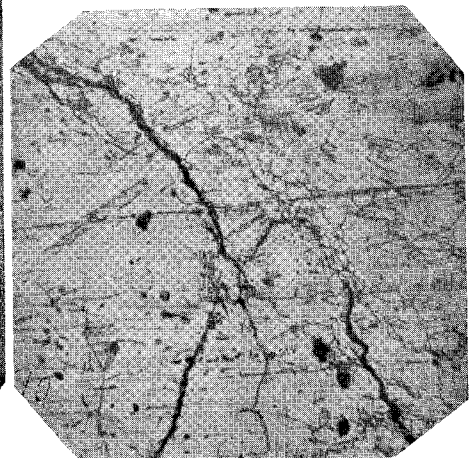
破断時間 = 85 min

表面より少し内部までのジグザグの
通路を通り、それから 53° の傾斜で
内部に侵入



(a)

× 440



(b)

× 140

写真 29 加工材

剪断応力 = 4.55 kg/mm^2

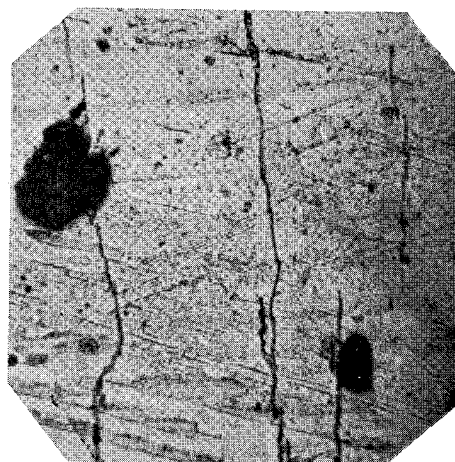
破断時間 = 94 min

(a) の傾斜: 65°

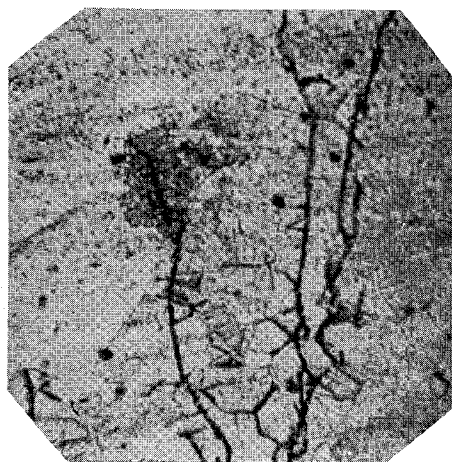
(b) 試料の両側からの亀裂の接近を示す。



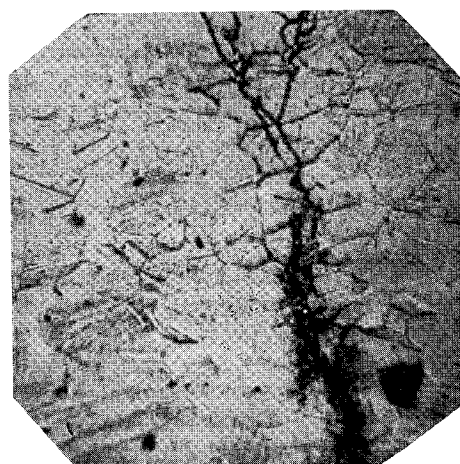
(c) × 140



(d) × 440

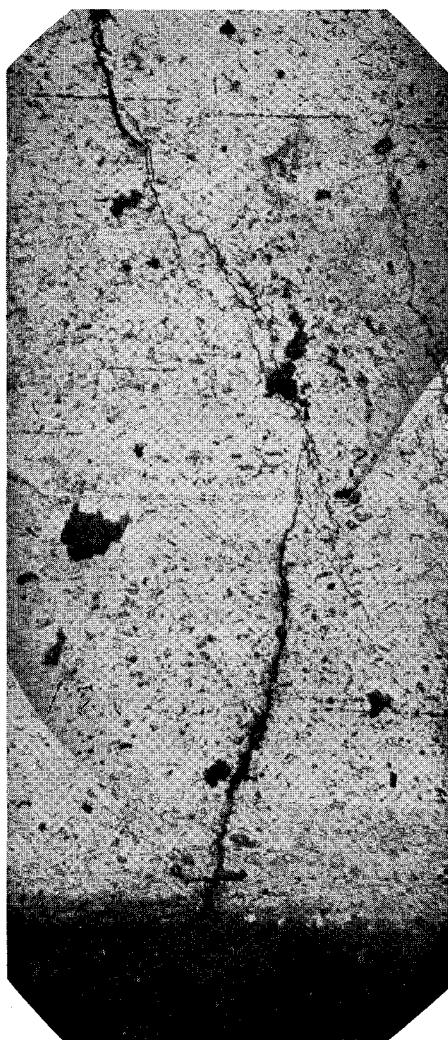


(e) × 440

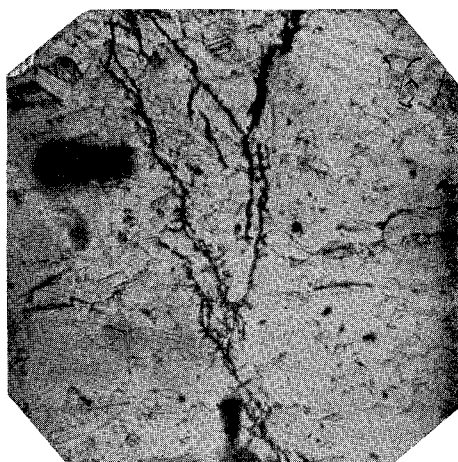


(f) × 440

(c) 最初の傾斜 75° , 以後はかえつて垂直に進む
 (d) (c) の拡大部分, 結晶面亀裂が最初現れ,
 (e) 内部ではなくなり, 粒子境界で微少の変
 (f) 化を示すのみ。



(a) $\times 144$



(b) $\times 440$

写真 30 加工材

剪断応力 = 1.68 kg/mm^2

破断時間 = 124 min

最初はむしろ逆方向に入り，内部で 65° の傾斜を示す。

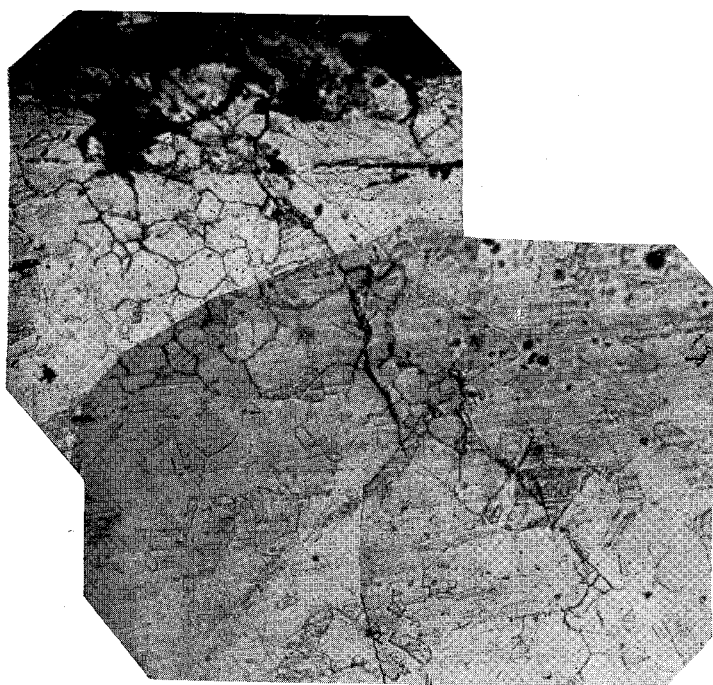


写真 31 焼 鈍 材

× 305

写真 31 焼 鈍 材

破断応力=6.9 kg/mm²

破断時間=83 min

表面では粒界亀裂を示す

傾斜 45°



写真 32 焼 鈍 材

剪断応力=6.9 kg/mm²

破断時間=104 min

亀裂の拡大, 先端の粒子貫通亀裂の傾斜 77°

× 305



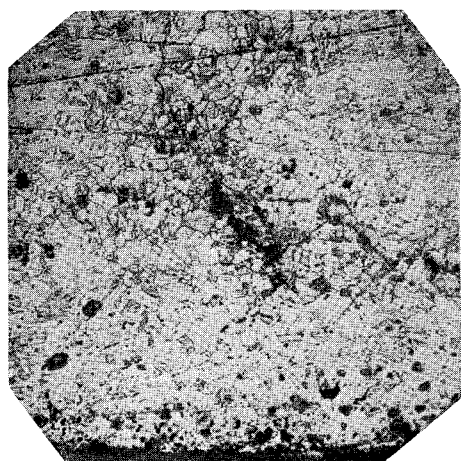
写真 33 焼 鈍 材

剪断応力=6.8 kg/mm²

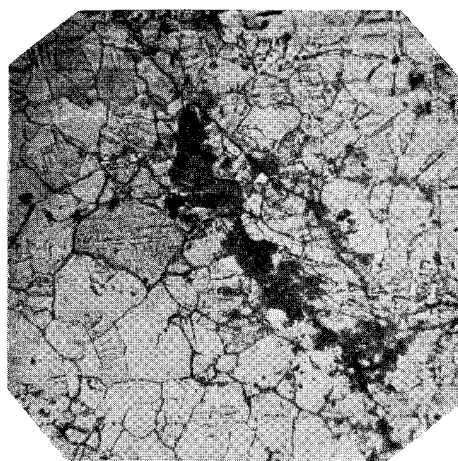
破断時間=222 min

亀裂の拡大, 塑性変形を示す

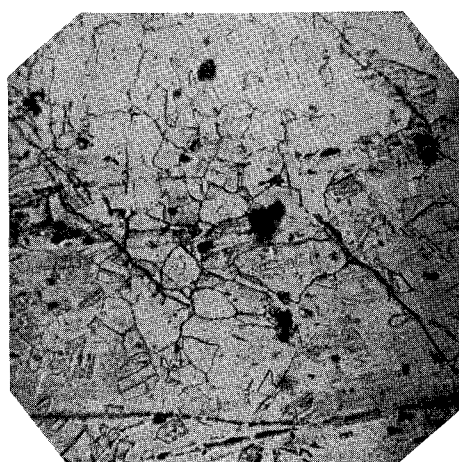
× 305



(a) $\times 98$



(b) $\times 305$



(c) $\times 305$

写 真 34 焼 鈍 材

剪断応力 = 6.15 kg/mm^2

破断時間 = 377 min

- (a) 試料の中程での拡大亀裂を示す
- (b) 同上拡大
- (c) 両側からの亀裂の連結



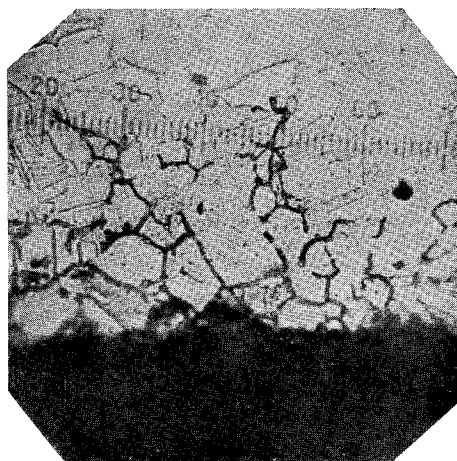
写真 35 焼 鈍 材

剪断応力 = 5.2 kg/mm^2

破断時間 = 885 min

(a) } 最初粒界亀裂を示し、つづいて

(b) } 粒子貫通となる。この傾斜: 75° , 先端で 47° となる。



× 305

写真 36 焼 鈍 材

剪断応力=5.1 kg/mm²

破断時間=2045 min で中止

主として粒子境界亀裂がありこの程度までで異常に長時間を要した